

Auswirkungen der Umgebungsbedingungen auf die Messergebnisse geotechnischer Messinstrumente im Sand und Beton

Dissertation
zur Erlangung des Grades
eines Doktor-Ingenieurs

vorgelegt von

M.Sc. Kaveh Ahangari
Aus dem Iran

SCHRIFTENREIHE
GEOTECHNIK UND MARKSCHEIDEWESSEN

KAVEH AHANGARI

**AUSWIRKUNGEN DER UMGEBUNGSBEDINGUNGEN
AUF DIE MESSERGEBNISSE GEOTECHNISCHER
MESSINSTRUMENTE IM SAND UND BETON**

Heft 15/2006

**Herausgegeben vom
Institut für Geotechnik und Markscheidewesen der TU Clausthal
Erzstraße 18, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, Telefon: 05323 / 72-2294**

Ahangari, Kaveh: Auswirkungen der Umgebungsbedingungen auf die Messergebnisse geotechnischer Messinstrumente im Sand und Beton. In: Wissenschaftliche Schriftenreihe Geotechnik und Markscheidewesen. TU Clausthal, Heft 15, 2006.

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Clausthal zur Erlangung des akademischen Grads eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation. Tag der mündlichen Prüfung war der 30. März 2006.

Vorsitzende der

Promotionskommission: Univ.-Prof. Dr. Heike Y. Schenk-Mathes

Hauptberichterstatte: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer

Berichterstatte: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hossein H. Tudescki

Der Druck dieses Hefts wurde aus Haushaltsmitteln des Instituts für Geotechnik und Markscheidewesen der Technischen Universität Clausthal finanziert.

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Busch, Univ.-Prof. Dr.-Ing. N. Meyer

© Kaveh Ahangari

Alle Rechte vorbehalten

Bezugsnachweis: TU Clausthal
Institut für Geotechnik und Markscheidewesen
Erzstr. 18
38678 Clausthal-Zellerfeld

Kontakt: Tel.: 05323/72-2294
Fax.: 05323/72-2479
Email: IGMCM@tu-clausthal.de

ISBN 3-938924-06-3

Totalspannungen stellen in der Geomechanik einen sehr interessanten Parameter für Konstrukteure dar, können jedoch bis heute nicht zuverlässig ermittelt werden. Obwohl Druckmessdosen (DMD) seit Jahrzehnten hergestellt und erfolgreich eingesetzt werden, ist die Genauigkeit der mit ihnen ermittelten Spannungen oftmals unzureichend.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Einflussfaktoren auf die Ergebnisse geotechnischer Messinstrumente untersucht. Die Ermittlung wurde in zwei umgebenden Medien, Sand und Beton, durchgeführt. Es werden der Stand der Technik und auswirkende Parameter und ihre Beeinflussung auf die Messergebnisse im Boden und Sand vorgestellt.

Die Untersuchungen im Sand wurden in zwei Hauptteilen durchgeführt. Im ersten Teil der Arbeit wurden verschiedene Einflussfaktoren im Sand, wie z.B. der Formfaktor (Verhältnis von Durchmesser zu Dicke), das Verhältnis der Steifigkeit der DMD zur Steifigkeit des umgebenden Mediums (weicher und steifer Einschluss), die Temperaturänderung, die Größe der Druckmessdose, Lage der DMD und umliegende Druckmessdosen auf die Ergebnisse der ermittelten Spannungen untersucht.

Durch die erste Versuchsreihe im Sand wurde herausgefunden, dass weicher und steifer Einschluss ein wichtiger Einflussparameter auf die Ergebnisse der Druckmessdosen im Boden ist. Daher wurden in der nächsten Versuchsreihe versucht, mit Anwendung der unterschiedlichen Ummantelungsmaterialien diesen Effekt detailliert zu untersuchen und Empfehlungen zur Verbesserung der Ergebnisse durch die Anwendung der Ummantelung beim Einbau der Druckmessdosen vorzustellen. Das Ziel der Untersuchungen stellte die Entwicklung einer analytischen Gleichung zur Optimierung des Ummantelungsmaterials der DMD dar, um dadurch eine Verbesserung der Messgenauigkeit der DMD zu erzielen.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden die Einflüsse der Umgebungsbedingungen auf den Temperatur-, Dehnungs- und Spannungsverlauf durch Abbindeprozesse im Beton untersucht. Ziel war dabei, den Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Messergebnisse zu ermitteln. Dabei wurde sowohl der Einfluss der Betonzusammensetzung durch Variation des w/z-Wertes, der Zementart und der Lagerungsbedingungen als auch der Einfluss der Probenmaße und Umgebungstemperatur auf die Abbindeprozesse des Betons untersucht.

Die Druckmessdosen wurden mehrfach in Betonkörpern eingebaut um die Gründe des Abrisses des Kontaktes zwischen Beton und Druckmessdose zu bestimmen. Die Betonkörper wurden über die Zeit mit äußerer Spannung belastet und die Änderung der gemessenen Spannungen unter Belastung über die Zeit untersucht.

Dazu wurden die Ergebnisse verschiedener Dehnmessgeber (unterschiedliche Herstellarten, Größen und Genauigkeiten) miteinander verglichen.

Inhaltverzeichnis

1	Einführung.....	1
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2	Inhaltliche Übersicht.....	4
2	Stand der Technik.....	6
2.1	Stand des Wissens	6
2.2	Zweck und Anwendungsbereich	8
2.3	Grundlagen und Begriffe.....	9
2.4	Messprinzip	9
2.4.1	Dehnungsmessungen	9
2.4.2	Spannungsmessungen	12
2.4.2.1	Spannungsgeber nach dem Deformationsmessprinzip.....	14
2.4.2.2	Spannungsgeber nach dem Kompensationsmessprinzip	15
2.4.3	Steifigkeit der Spannungsgeber (weicher und steifer Einschluss)	17
2.5	Einbau der Spannungsgeber	19
2.5.1	Erddruckmessgeber	19
2.5.2	Gebirgsspannungsgeber.....	19
2.5.3	Kontaktspannungsgeber	20
2.5.4	Betonspannungsgeber	21
2.5.5	Herstellung von Spannungsmessquerschnitten.....	26
2.6	Durchführung der Messung	27
3	Auswirkende Parameter auf die Messergebnisse	29
3.1	Einführung.....	29
3.2	Auswirkende Faktoren auf die Ergebnisse des Spannungsgebers im Boden	30
3.2.1	Spannungsgebereigenschaften und Geometrie.....	31
3.2.2	Ummantelungsparameter.....	35
3.2.3	Temperaturbeeinflussung	39
3.2.4	Auflagerungsbedingungen und Einbaumethode	40
3.2.5	Bodeneigenschaften	43
3.3	Einflussfaktoren auf die Ergebnisse der Messelemente im Beton	45
3.3.1	Eigenschaften des Betons	45
3.3.1.1	Betonabbindeprozess	45
3.3.1.2	Schwinden.....	47
3.3.2	Experimentelle Bestimmung von Temperaturspannungen	48
3.3.2.1	Spannungsmessungen	48
3.3.3	Einfluss der Temperatur auf den Hydratations- und Erhärtungsverlauf	51
3.3.4	Beeinflussung der Abmessung des Betonkörpers	53
3.3.5	Beeinflussung der Zementart.....	53
3.3.6	Beeinflussung des Wasserzementwertes	55
4	Untersuchung der Auflagerungsbedingungen	56
4.1	Versuchsprogramm.....	56
4.2	Kalibrierung der Druckaufnehmer	56
4.3	Bodenmechanische Eigenschaften des Versuchsmaterials	57
4.4	Versuchsrandbedingungen	57
4.5	Vorversuche	59
4.5.1	Versuche mit kleiner Belastungsplatte	59
4.5.1.1	Versuchsergebnisse.....	59
4.5.2	Variierung der Belastungsplatte	61
4.5.2.1	Versuchsergebnisse.....	61
4.6	Variation des Druckmessdosendurchmessers.....	63
4.6.1	Druckmessdosen Durchmesser D = 12 cm	65

4.6.2	Druckmessdosendurchmesser $D = 5 \text{ cm}$	67
4.6.3	Vergleich der Ergebnisse	68
4.7	Spannungsverteilung unter der Belastungsplatte.....	69
4.8	Einfluss der Steifigkeit der Messelemente	72
4.9	Einfluss der Lageneigung.....	75
4.10	Einfluss der Temperatur	75
4.11	Beeinflussung durch umliegende Druckmessdosen	76
5	Die Auswirkungen der Verwendung der Ummantelung auf die Ergebnisse der Druckmessdosen	78
5.1	Randbedingungen	78
5.2	Versuchsergebnisse.....	81
5.2.1	Einfluss der Korngröße.....	81
5.2.1.1	Druckmessdosenummantelung mit feinem Sand ($0,1 - 0,4$).....	81
5.2.1.2	Druckmessdosenummantelung mit Tonmehl ($w = 32 \%$).....	85
5.2.2	Theoretische Spannungsermittlung.....	91
5.2.2.1	Berechnete vs. gemessene Spannungen (Sand, $1 - 4 \text{ mm}$).....	92
5.2.2.2	Berechnete vs. gemessene Spannungen (Kies, $2 - 12 \text{ mm}$)	94
5.2.3	Großversuch mit Kies $0 - 36 \text{ mm}$	95
5.3	Feldversuch.....	97
6	Beeinflussung der Messergebnisse geotechnischer Messinstrumente durch den Betonabbindeprozess.....	100
6.1	Verwendete Messinstrumente.....	100
6.2	Versuchsprogramm	101
6.3	Versuchsergebnisse.....	103
6.3.1	Temperatur-, Dehnungs- und Spannungsänderungen.....	103
6.3.1.1	Messergebnisse im jungen Beton	103
6.3.1.2	Temperatur-, Dehnungs- und Spannungsverlauf im erhärteten Beton.....	106
6.3.2	Auswirkung variierender Zementarten	109
6.3.2.1	$W/Z = 0,50$	109
6.3.2.2	$W/Z = 0,67$	111
6.3.3	Einfluss des w/z - Wertes	112
6.3.3.1	Zement CEM I 42,5	112
6.3.3.2	Zement CEM II/A-S 52,5	115
6.3.3.3	Zement CEM III/B (32,5).....	116
6.3.4	Veränderung der Umgebungstemperatur.....	117
6.3.5	Auswirkung variierender Betonkörperabmessungen.....	123
6.3.6	Auswirkung variierender Lagerungsbedingungen des Betonkörpers.....	125
6.3.6.1	Kurzzeitige Lagerung unter Wasser	125
6.3.6.2	Dauerlagerung unter Wasser	126
6.3.7	Beeinflussung der Messergebnisse der verwendete Messinstrumentgröße	128
6.3.8	Verhalten unter Druckbelastung	129
6.4	Einbau von Betondruckmessdosen.....	130
6.4.1	Einbau innerhalb der Betonkörper.....	130
6.4.1.1	Variation der Abbinde temperatur.....	130
6.4.1.2	Veränderung der Betoneigenschaften.....	131
6.4.2	Einbau der Betondruckmessdose auf die Betonkörper	133
7	Umsetzung der Erkenntnisse bei konkreten Bauvorhaben	135
8	Zusammenfassung und Empfehlung	138
9	Summary	143
10	Literaturverzeichnis	145

Anhänge

Anhang A: Verzeichnis häufig verwendeter Bezeichnungen und Symbole

Anhang B: Abbildungen 1 bis 15

Anhang C: Tabellen C1 bis C4

1 Einführung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Messinstrumente werden zur Ermittlung des Kraftflusses im Bauwerk und der Spannungsverteilung im Untergrund an signifikanten Punkten zur Verifizierung des theoretischen Kraftflusses installiert. Bei der messtechnischen Überwachung im Rahmen der Beobachtungsmethode von Bauwerken ist es in der Vergangenheit trotz Beachtung aller bekannten Parameter immer wieder zu teilweise gravierenden Messabweichungen, kaum interpretierbaren Messergebnissen oder zum vermeintlichen Ausfall von Messinstrumenten (Druckmessdosen, Dehnungsgeber) gekommen.

Zerstörung durch Unachtsamkeit, unsachgemäßen Einbau oder unzureichende Planung konnten jedoch in den meisten Fällen ausgeschlossen werden, sodass weitere, bisher nicht ausreichend erforschte Einflüsse auf die Messinstrumente wirken müssen. Abweichungen (z.B. Nullpunktverschiebung, von Laborversuchen abweichende Belastungsgerade) treten meist dann ein, wenn durch den Abbindeprozess des Betons große Temperatur- und Spannungsschwankungen gemessen werden. Für die messtechnische Überwachung sind daher im Regelfall projektspezifisch aufwändige Voruntersuchungen durchzuführen, die überwiegend von auf Messtechnik spezialisierten Mitarbeitern der bauausführenden Firma durchgeführt werden müssen.

Durch die Ausweitung der Beobachtungsmethode in der Neufassung der DIN 1054 [2005] wird die messtechnische Überwachung nicht mehr überwiegend nur bei großen Bauvorhaben sondern auch bei kleineren Bauwerken (Brücken, Erdfällen, Stützkonstruktionen) Bestandteil der Konstruktion. Derzeit sind zum Einbau und zur Auswertung der Messergebnisse Spezialkenntnisse erforderlich. Durch systematisierte Auflagerungsbedingungen soll die Anwendung in Zukunft vereinfacht werden.

Von der Theorie abweichende Messergebnisse werden in der Regel mit ingenieurmäßigem Sachverstand „interpretiert“ oder aufwändig und mit großem Zeitaufwand verbunden, durch Nachrechnung mit der Methode der Finiten Elemente kalibriert. Ziel ist es hierbei, die gemessenen Werte derart anzupassen, dass sie mit den vorher auf theoretischer Basis berechneten Spannungen und Verformungen äquivalent sind. Zahlreiche Projekte zeigen, dass zwischen Messwert und ausgewertetem bzw. interpretiertem Wert durch diese Vorgehensweise gravierende Abweichungen bestehen können. Eine „Anpassung“ der Messdaten an den vom Ingenieur „erhofften“ realen Spannungszustand ist begrenzt möglich, stellt aber besonders bei größeren Abweichungen einerseits die Richtigkeit der Interpretation, vor allem aber die generelle Glaubwürdigkeit der Messtechnik in Frage, da den gemessenen Werten nur eine begrenzte Aussagekraft zugetraut wird.

Bei der messtechnischen Überwachung im Rahmen der Beobachtungsmethode ist es in der Vergangenheit immer wieder zu kaum interpretierbaren Messergebnissen oder zum Ausfall

von Messinstrumenten gekommen. Dies gilt sowohl für indirekte als auch direkte Messungen der Kräfte und Spannungen im Beton. Während des Einbaus unterliegen Messinstrumente einem steten Wandel der Umgebungsbedingungen, die sich auf den Messwert und damit auf die daraus berechnete Kraft auswirken. Die Messinstrumente verändern durch Temperaturschwankungen (differente Ausdehnungskoeffizienten des Öls in der Druckmessdose und des umgebenden Stahls), Lagerungsbedingungen, Scherverformung und den Abbindeprozess des Betons (Wechsel vom Spannungs- Dehnungsverhalten des Messinstrumentes zum Spannungs- Dehnungs-Verhalten der Verbundkonstruktion Messelement - Beton) den gemessenen Wert. Da diese Einflüsse in der Gesamtheit nicht zu verifizieren sind, müssen sie getrennt ermittelt werden. Für Messungen mit der schwingenden Saite liegen Korrekturfaktoren für Temperaturänderungen und absolute Einbauhöhen (atmosphärischer Druck) des Messelementes vor, die die Berechnung der Auswirkungen auf den Messwert ermöglichen sollen. Diese Korrekturen beziehen sich jedoch ausschließlich auf die Einflüsse auf den Messgeber. Dieselben Einflüsse auf das Messinstrument an sich (Flüssigkeit, Messgerät-material, "Ummantelung" des Messgebers) bleiben jedoch unberücksichtigt und verändern die aus dem Messwert berechnete Kraft. Jeder einzelne Faktor kann gravierende Änderungen hervorrufen und darf nicht vernachlässigt werden.

Weiterhin sind die sich durch den Abbindeprozess des Betons ergebenden Änderungen des Spannungs- Dehnungsverhaltens der Messinstrumente ermittelt worden. Um die zeitliche Entwicklung von Kraftverläufen im Bauwesen, insbesondere in der Geotechnik, zu erforschen und daraus neue Konzepte für ökonomischere und realitätsnähere Bemessung zu erreichen, werden Messsysteme installiert. Dies ist besonders notwendig in Bereichen, in denen generelle Aussagen aus dem Labor nicht unbedingt auf die Situation in situ übertragen werden können. In der Geotechnik ist dieser Faktor grundsätzlich immer gegeben. Die Qualität der Messungen wird durch Installation und Auswertung maßgeblich beeinflusst. Durch steigende Qualität der Messelemente können diese immer mehr verbessert werden und die Aussagekräftigkeit steigern. In den letzten Jahren wurden deutliche Verbesserungen erreicht, die jedoch weiterer Forschung bedürfen.

Ein wesentlicher Einfluss auf die Ergebnisse der Messungen wurde bisher nicht berücksichtigt: die durch Abbindewärme des Betons entstehenden Veränderungen der Messergebnisse. Gerade die Messungen der schwingenden Saite werden maßgeblich beeinflusst, da diese ein anderes Material-Dehnungsverhalten aufweist als der umgebende Beton. Bisher wurden die Messungen daher vereinheitlicht, in dem Nullwerte jenseits der Temperatureinflüsse und damit auch nach Abklingen der Zwangspannungen gesucht wurden. Dies entspricht jedoch nicht der Realität.

Besonders prägnant scheint jedoch der Einfluss der Temperatur auf die Spannungsmessung zu sein, da verschiedene Spannungs- Dehnungskomponenten betrachtet werden müssen.

Während zu Beginn der Erhärtungsphase das Ausdehnungsverhalten des Betons maßgebend ist, ändert sich dieser Zustand mit der Zeit und das Spannungs-Dehnungsverhalten des Betons überlagert und verdrängt diesen Einfluss. Wichtig ist dieser Einfluss auf die Verzerrung des Betons und damit die aktivierten Mantelkräfte, da eine mit der Zeit abnehmende Dehnung in aufgebrachte Kraft umgerechnet wird. Wenn diese Dehnung in den Berechnungen nicht beachtet wird, erhöht sich die am Anfang errechnete Mantelreibung, da sich die Einflüsse aus Dehnungsverringerung (Zwangsspannungen) und durch die aufgebrachte Last überlagern. Nützlich ist daher eine genauere Betrachtung dieser Entwicklung sowohl im Labor an massigen Bauteilen als auch in der Praxis, wo zahlreiche Messungen eben jenen Zustand darstellen, die bisher in der endgültigen Auswertung aber nicht berücksichtigt werden.

Ziel der Untersuchung ist es Fehlerquellen beim Installieren von Messinstrumenten zu erfassen. Einflüsse, die zu abweichenden Messergebnissen führen, sollen ermittelt und durch entsprechende Parameter in der Berechnung von Spannungen und Dehnungen berücksichtigt werden. Es sollen Richtlinien für die Lagerungsbedingungen von Druckmessdosen in verschiedenen Bodenverhältnissen erarbeitet und die von den Herstellern angegebenen Faktoren zur Bereinigung von Temperaturschwankungen modifiziert werden, um realitätsnahe Berechnungsergebnisse zu erhalten. Der Temperatureinfluss wird größer, je kleiner das Bauvorhaben ist, da oberflächennah größere Schwankungen der Bodentemperatur zu verzeichnen sind.

Durch die Erfassung dieser Parameter kann die Menge nicht interpretierbarer Messergebnisse verringert werden. Bei gleicher Instrumentierungsdichte steht damit in Zukunft, verglichen mit den bisher aus Messungen verwendbaren Messdaten, eine größere Anzahl von Messdaten geotechnischer Messungen zur Überprüfung des Kraftflusses im Bauwerk zur Verfügung. Für diese Messergebnisse brauchen keine aufwändigen, und den Messwert in Frage stellenden Anpassungen vorgenommen zu werden, und können dem Auftraggeber direkt übergeben werden. Aufwändige Nachinstrumentierungen zur Verifizierung bestimmter einzelner Einflüsse können damit entfallen.

Die Ergebnisse dieser Messungen können darüber hinaus zweifelfrei als Referenzmessungen für zukünftige Bauprojekte verwendet oder in Forschungsarbeiten implementiert werden. „Angepasste“ Messdaten können nur schwer zum Vergleich herangezogen werden. Dadurch können Gründungskonstruktionen weiter optimiert, wirtschaftlicher bemessen und ausgeführt werden.

Es wird angenommen, dass die Auflagerungsbedingungen (verwendetes Material, Abweichung von der horizontalen Lage) und die Temperatur bei Erddruckdosen, die an den Kontaktflächen zum Beton oder im Beton eingebaut werden, signifikant von der Abbindewärme des Betons beeinflusst werden. Während des beginnenden Abbindeprozesses findet eine Volumenreduzierung des Betons statt. Bei der Hydratation des

Zementes entstehende Reaktionsprodukte beanspruchen ein kleineres Volumen als die Verformungen des Betons. Sie kommen mit zunehmendem Aussteifen ziemlich rasch zum Stillstand, während das chemische Schrumpfen aber so lange weiter geht, wie die Hydratation andauert [GRÜBL et al., 2001]. Dieser Prozess verändert das Temperatur-Dehnungsverhalten der Messinstrumente und damit unmittelbar auch die Qualität der Messergebnisse. Die Messwerte weichen z.T. signifikant von den kalibrierten Werten ab. Im Laborversuch gemessene Kalibrierkurven können deshalb nicht für das Spannungs-Dehnungsverhalten unter Bauwerksbedingungen in Betracht gezogen werden. Die mit der Druckdose in diesem Zustand gemessenen Spannungen im Bauwerk entsprechen nicht den real existierenden.

In den Voruntersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Erwärmung des Druckmessgebers eine Nullpunktverschiebung zur Folge hatte. Das Erwärmen der Druckdose ändert zusätzlich die Steigung der Belastungsgeraden.

1.2 Inhaltliche Übersicht

Im Rahmen der Literaturstudie (Kapitel 2) werden das Messprinzip, der Zweck und der Anwendungsbereich von Messinstrumenten dargestellt, wobei im zweiten Teil (Kapitel 3) die Einflussparameter und ihre Auswirkungen auf die Messergebnisse geotechnischer Messinstrumente präsentiert werden. Dabei werden bisherige Literaturerkenntnisse und die allgemeine Funktionsweise von Druckmessdosen und Dehnungsmessstreifen erläutert.

Die Untersuchungen wurden mit zwei Materialien, Boden und Beton als Umgebungsmedium durchgeführt. In Kapitel 3 werden die Einflüsse verschiedener Faktoren auf die Messergebnisse im Boden und im Beton, z.B. durch den Abbindeprozess infolge Hydratation, vorgestellt.

Im Weiteren folgen die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen im Boden, welche in zwei Hauptteile, Beeinflussung der Auflagerungsbedingungen (Kapitel 4) und Verwendung der Ummantelung (Kapitel 5), gegliedert sind.

Bei Untersuchung der Auflagerungsbedingungen in Kapitel 4 werden die Auswirkungsparameter, die auf die Ergebnisse der geotechnischen Messinstrumente wirken, und ihre Beeinflussung ermittelt. Hierzu werden u.a. der so genannte weiche und steife Einschluss der Druckmessdose im Umgebungsmaterial, die Eigenschaften der Druckmessdosen, die Spannungsverteilung, die Lageneigung, die Temperatureinflüsse und die Beeinflussung umliegender Druckmessdosen untersucht.

Zunächst wird die Beeinflussung unterschiedlicher Ummantelungsmaterialien auf die Ergebnisse der Druckmessdosen in Kapitel 5 untersucht. Außerdem wird eine eigene Gleichung zur Bestimmung der Parameter der verwendeten Ummantelung bei dem Druckmessdoseneinbau zur Optimierung der Messergebnisse vorgestellt, und anschließend wird die Genauigkeit der empfohlenen Gleichung überprüft und ein Korrekturfaktor zu der

Gleichung hinzugefügt. Diese Gleichung wurde anhand von zahlreichen Labor- und Feldversuchen überprüft.

Der Versuchsstand, die verwendeten Materialien und Messelemente, das Versuchsprogramm sowie die Versuchsergebnisse im Beton werden in Kapitel 6 beschrieben. Im Beton wurden der Temperatur-, Dehnungs- und Spannungsverlauf sowie die auswirkenden Faktoren und deren Stärken durch den Abbindeprozess ermittelt. Diese Ermittlungen wurden durch die Langzeitbeobachtungen kontrolliert. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse der verschiedenen Dehnungsmessgeber verglichen.

In Kapitel 7 werden die in den Laborversuchen im Beton ermittelten Erkenntnisse anhand von Feldversuchen verifiziert.

Ein Zusammenfassung der Ergebnisse sowie eine Auswertung schließen sich im letzten Abschnitt an.

2 Stand der Technik

2.1 Stand des Wissens

Die richtige Abschätzung der durch den Aufbau und die Belastung verursachten Spannungen im Boden und ihre Änderungen sind für gute Ingenieurbauplanung wichtig. Obwohl die Bodenspannungen durch mehrere Analysenverfahren abgeschätzt werden können, ist die aktuelle Spannungsmessung zum Bestätigen der vorhergesagten Werte schwer.

Baumaßnahmen ändern die Spannungen im umgebenden Medium. Zur Sicherung der Bauwerke werden die Spannungen bzw. die Spannungsänderungen gemessen.

Spannungsmessungen in Bauteilen bzw. zwischen Bauteilen und Gebirge werden üblicherweise in Form von Dehnungsmessungen oder hydraulischen Druckkissen ausgeführt.

In der Mechanik bilden Dehnungsmessungen die häufigste Grundlage für Festigkeitsuntersuchungen und Spannungsanalysen. Mit ihrer Hilfe lässt sich die Beanspruchung von Bauteilen bei bekanntem E-Modul des Werkstoffes rechnerisch ermitteln.

Die Herstellung einer Druckmessdose mit gleichen Spannungs- Dehnungs- Zeitkennwerten wie die des umgebenden Bodens ist bis jetzt nicht praktikabel. Die Rheologie der Böden ist eine komplizierte Funktion von Bodenart, Spannungshistorie, Schub- und Normalspannungsebenen, Rand- und Drainagebedingungen und vielen anderen Umgebungsbedingungen. Die Berücksichtigung der oben genannten Faktoren ist sehr schwierig in einer Druckmessdose zu realisieren. Deshalb entspricht der bei eingebauten Druckmessdosen gemessene Spannungszustand oft nicht dem Spannungszustand ohne Druckmessdose. Der Umstand, dass der Primärspannungszustand nicht mit den gemessenen Spannungen übereinstimmt, führt dazu, dass Korrekturfaktoren gefunden werden müssen, um von den gemessenen Spannungen auf den wahren Spannungszustand schließen zu können.

Wenn Erddruckgeber wirtschaftlich eingesetzt werden (d.h. ohne Kalibrierung im entsprechenden Bodenmaterial und ohne Zeitaufwand zum Erlernen der mechanischen Zusammenhänge), sind die Ergebnisse in aller Regel unbrauchbar. Die Erddruckmesswerte sind in den meisten Fällen auf sorgfältig durchgeführte Laboruntersuchungen beschränkt [WEILER, KULHAWY, 1982].

Derzeitiger Standard bei der messtechnischen Überwachung von Sohldruckspannungen oder Pfahlkopfkraften ist die Messung mittels hydraulischer Druckmessdose. Die Dose besteht aus zwei Edelstahlplatten, die an den Rändern verschweißt sind. Die Druckmessdose „arbeitet“ durch eine vergleichsweise dünne, flexible Deckplatte, die den

anstehenden Druck auf die ölgefüllte Innenseite und somit den Drucksensor überträgt. Zur Reduzierung der Eigensteifigkeit und Erhöhung der Messgenauigkeit werden Druckmessdosen mit sehr dünnen, geringe Steifigkeiten aufweisenden Stegen an den Rändern oder randnahen Nuten (bei großer Eigensteifigkeit der Stege) hergestellt. Dies definiert einen größtmöglichen Messbereich, der durch die relativ hohe Flexibilität der Messfläche Gewölbewirkungen des umgebenden Materials weitgehend verhindert. Empirisch sind für die Verhältnisse Baugrundsteifigkeit/Druckdosensteifigkeit, Druckdosengröße/Druckdosenhöhe und Druckdosengröße/Verformungsfähigkeit Werte ermittelt worden [HUGGENBERGER, 1951; WEILER, KULHAWY, 1982; DUNNICLIFF, 1993; INTERFELS, 1994], die realitätsnahe Messergebnisse liefern können.

Obwohl Druckmessdosen seit Jahrzehnten hergestellt und tausendfach eingebaut worden sind, ist die Kritik an ihnen nie ganz verstummt. Sie seien, besonders im unteren Messbereich, vergleichsweise unzuverlässig, und außerdem hänge das Messergebnis weitgehend von der Qualität des Einbaus [INTERFELS, 1994].

Die Erddruckmessdosen zeigen generell keine richtigen Bodenspannungen (Über- oder Unterschätzung). Es zeigt sich, dass die Genauigkeit von Druckmessdosen nicht groß genug ist, um die wahre Spannungsänderung zu zeigen. Es ist aber wohl möglich die Richtung der Spannungsänderung zuverlässig festzustellen [LINGS et al., 1993].

Unter definierten Laborbedingungen können hingegen selbst geringe Spannungsänderungen gemessen werden. SELLERS (1994) stellte bei der Kalibrierung von Druckmessdosen, die zwischen Stahlplatten eingebaut waren, Abhängigkeiten von den Abmessung des Belastungsstempels, der Dicke der zur Belastung verwendeten Stahlplatte und der Größe der Druckmessdose fest. Diese geringen Auflagerungsänderungen führten zu Schwankungen des gemessenen Druckes von ca. 10%.

KÜGLER, JUNG (2001) untersuchten die Abhängigkeit von aufgebracht zu gemessener Belastung bei Druckdosen unter verschiedenen Auflagerungsbedingungen. Bei Auflagerung einer Polystyrolplatte auf die Druckmessdose wurden sehr gute Übereinstimmungen von aufgebracht zu gemessener Last ermittelt, wohingegen bei Elastomerauflagerungen Abweichungen von bis zu 50% auftraten. Es stellte sich heraus, dass allein die Wahl des Auflagers eine Abweichung von bis zu 50% ergeben kann. Hierbei ergab sich jedoch nicht eine Abhängigkeit von harter oder weicher Lagerung, sondern vom Materialtyp. Es ergab sich eine Abhängigkeit von der Materialart, nicht von der Steifigkeit, die gleichen Ergebnisse wurden jeweils für harte und weiche Platten festgestellt.

BRUZZI et al. (1999) verweisen auf die Notwendigkeit des vollständigen Kontaktes von Messelement mit umgebendem Bodenmaterial, um eine möglichst ganzflächige Lasteintragung auf das Druckkissen zu gewährleisten. Als gravierender Fehler der derzeitigen Praxis wird die Wahl der Kalibrierung angesehen. Druckmessdosen werden in einer Prüfpresse oder unter Wasser (einem stetig isotropen Medium) kalibriert. Beim Einbau

der Druckmessdose ist dieses jedoch meistens auf Sand gelagert, einem diskreten, anisotropen Material. Zum Ausschluss der Ungenauigkeiten werden von den Autoren aufwändige in situ Kalibrierungen empfohlen. Die Kalibriermethode im Wasser ist geeignet für Druckmessdosen in weichem Ton, für exakte Messungen unter abweichenden Bodenbedingungen müssen alternative Kalibriermethoden gefunden werden.

Die bisher durchgeführten Versuche zu den Lagerungsbedingungen von Druckmessdosen erfolgten projektspezifisch und waren entsprechenden Randbedingungen angepasst, sind somit nur bedingt allgemeingültig.

Zur Erfassung des in der Druckdose wirkenden Druckes werden verschiedene Gebertypen als Drucksensoren eingesetzt: Membranschalter, Schwingsaitendruckgeber und Piezoresistive Druckgeber. Für die i.d.R. ausgeführten Langzeitbetrachtungen ist der Schwingsaitengeber Standard. In Abhängigkeit des in der Messdose wirkenden Druckes, bzw. der Dehnung des Dehnungsgebers, ändert sich die elektrisch erfasste Schwingungsfrequenz der Saite. Aus der gemessenen Frequenz wird unter Berücksichtigung der Kalibrierungsfaktoren der wirkende Druck bzw. die Dehnung ermittelt. Dieses System weist gegenüber dem herkömmlichen mechanischen Messverfahren Vorteile auf, da Messwerte z.B. über längere Zeit automatisch aufgezeichnet und in bestimmten Zeitabständen während und nach der Baumaßnahme ausgelesen werden können.

Im Laborversuch untersuchten CHOQUET et al. (1999) die Stabilität und Dauerhaftigkeit von Sensoren nach dem Prinzip der schwingenden Saite gegenüber mechanischen Einflüssen und Langzeitverhalten. Verschiedene Sensoren wurden aus Langzeitversuchen gewonnen und im Labor neu kalibriert. Die Veränderung der Messwerte lag in einem baupraktisch irrelevanten Bereich. Nur für extreme mechanische Erschütterungen wurden signifikante Nullpunktabweichungen ermittelt. Veränderungen von Spannungsdifferenzen sowie Temperatureinflüsse wurden nicht untersucht.

Eine einfache, aber kostenintensive Möglichkeit die Messergebnisse zu überprüfen, ist die Anordnung redundanter Messsysteme, die jedoch, trotz deutlich höherer Kosten, nicht immer zu schlüssigen (den theoretisch berechneten) Ergebnissen führen.

2.2 Zweck und Anwendungsbereich

Während und häufig auch nach einer Boden- oder Felsbaumaßnahme ändern sich die Spannungen im umliegenden Boden oder Gebirge, an der Grenzfläche Gebirge/Bauwerk sowie innerhalb des Bauwerks. Die Kenntnis dieser Spannungsänderungen kann zur Kontrolle der statischen Annahmen dienen und für die Beurteilung der Standsicherheit des Bauwerks von entscheidender Bedeutung sein.

Totalspannungsgeber im Boden fallen in zwei Grundkategorien: Messung innerhalb einer Bodenmasse und auf die Fläche von einem Strukturelement. Für die erste Kategorie werden

eingebettete Erddruckmessdosen und für die zweite Kontakterddruckmessdosen verwendet [DUNNICLIFF, 1993].

Die hauptsächlichen Gründe für die Verwendung der Erddruckmessdosen sind: zur Festigung der Bemessungsannahme und die Informationen zur Verbesserung von künftigen Planungen zur Verfügung zu stellen.

2.3 Grundlagen und Begriffe

Primärer Spannungszustand: Der Spannungszustand des unverritzten Mediums wird als primärer Spannungszustand bezeichnet.

Sekundärer Spannungszustand: Im Zuge einer Baumaßnahme ändern sich die Spannungen im umgebenden Gebirge oder Boden. Als Ergebnis der Spannungsänderungen stellt sich im Boden oder Gebirge ein sekundärer Spannungszustand ein. Die Entwicklung und das Ausmaß der Spannungsänderungen sind im hohen Maße von der Art des Bauwerkes, den Eigenschaften des Mediums sowie vom Baugeschehen abhängig.

In der Fachliteratur werden darüber hinaus auch tertiäre und quartäre Spannungszustände unterschieden.

Boden- und Gebirgsspannungen: Die im Boden oder Gebirge herrschenden Spannungen werden allgemein als „Boden- oder Gebirgsspannungen“ bezeichnet. Der vollständige räumliche Spannungszustand des Bodens oder Gebirges besitzt drei Normal- und drei Schubspannungskomponenten. Druckkissen können grundsätzlich nur Normalspannungskomponenten messen. Bei vertikaler oder horizontaler Anordnung von Druckkissen im Boden kann die Änderung der horizontalen oder vertikalen Normalspannungskomponente gemessen werden. In der Nähe von Felshohlraumbauten werden Druckkissen auch so angeordnet, dass die tangential zur Ausbruchfläche wirksame Spannungskomponente normal auf das Druckkissen wirkt und so ihre Änderung gemessen wird.

Beton- und Tangentialspannungen: Die innerhalb einer Betonauskleidung auftretenden Spannungen werden allgemein als Betonspannungen bezeichnet. Bei gewölbten Betonkörpern entspricht die tangential zur Hohlraumform wirkende Betonspannung einer Tangentialspannung. Dieser Begriff ist besonders im Tunnelbau üblich (z. B. Tangentialspannung innerhalb der Außen- oder Innenschale).

2.4 Messprinzip

2.4.1 Dehnungsmessungen

Für Dehnungsmessungen an Beton- oder Stahlbauteilen werden Messaufnehmer auf Dehnungsmessstreifen- oder Schwingsaitenbasis eingesetzt.

Nach FECKER (2004) ist der Dehnungsmessstreifen – DMS – das am häufigsten angewandte Element zur Messung von Dehnungen oder davon abgeleiteten Größen. Bei der Dehnungsmessung mittels DMS wird die Formänderung eines Bauteiles auf den aufgeklebten oder aufgeschweißten Messgitterträger des DMS und von diesem auf das Messgitter übertragen. Das Messgitter selbst ändert dadurch seinen elektrischen Widerstand, Dehnung und Widerstandsänderung stehen in einem bekannten Verhältnis zueinander (s. Abbildung 2.1).

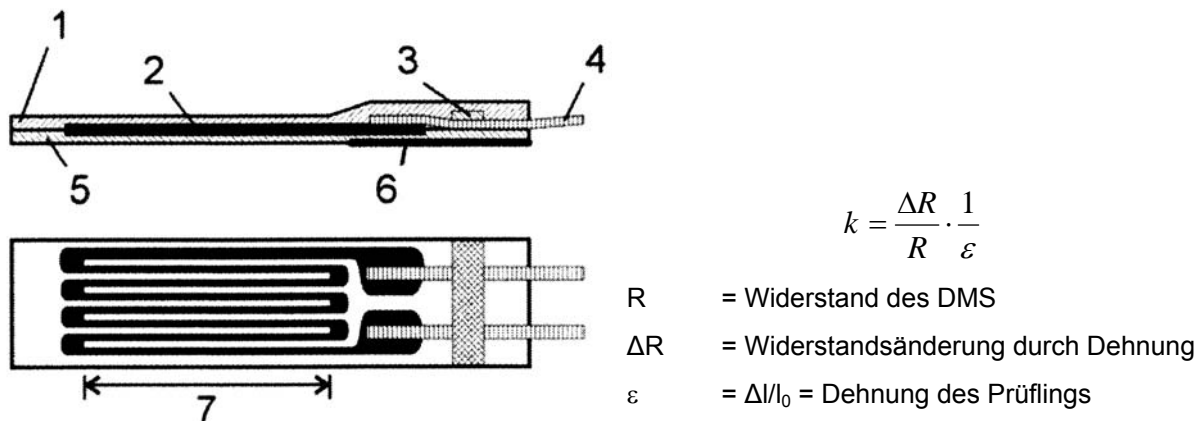


Abbildung 2.1: Aufbau eines Dehnungsmessstreifens [FECKER, 2004]

- 1 Abdeckung, 2 Messgitter, 3 Verankerung der Anschlussbänder,
 4 Anschlussbänder, 5 Träger, 6 Basisverstärkung, 7 Messgitterlänge

Üblicherweise wird die Widerstandsänderung in einer WHEATSTONEschen Brückenschaltung in eine proportionale elektrische Spannung umgeformt und in einem Verstärker soweit verstärkt, wie es zur Anzeige oder zum Betrieb von Registriergeräten bzw. zur Auslösung von Steuer- oder Regelvorgängen erforderlich ist.

Die Befestigung der DMS auf dem Messobjekt, z. B. durch kleben, erfordert besondere Sorgfalt und spezielle Vorbereitung der Messstellen sowie Maßnahmen zum Schutz der DMS vor Staub, Feuchtigkeit und mechanischer Beschädigung und kann deshalb i. a. unter Baustellenbedingungen nicht vorgenommen werden. Für den Einsatz im Bauwesen wurden deshalb spezielle Dehnungsaufnehmer für die Messungen an Stahlteilen – z. B. Tunnelbögen – sowie auf Beton entwickelt. Für Beton stehen auch Dehnungsaufnehmer auf DMS-Basis zum Einbetten zur Verfügung.

Größen, wie Dehnung, Weg und Temperatur lassen sich auch mit Messgebern auf Schwingsaitenbasis messen: Änderungen der Messgröße verursachen Änderungen der Dehnung und damit der Eigenfrequenz einer schwingfähig im Messwertaufnehmer eingespannten Messsaite. Die im Magnetfeld eines Elektromagnetsystems schwingende Saite induziert in der Magnetspule eine elektrische Schwingung gleicher Frequenz, die über Kabel auf das Empfangsgerät übertragen und dort zur Messwertbildung weiterverarbeitet

wird. Über das gleiche Elektromagnetsystem wird vom Empfangsgerät die Messsaite angeregt.

Veränderungen elektrischer Größen auf dem Übertragungswege (z. B. veränderliche Kabel- und Kontaktwiderstände, kapazitäts- und Spannungsschwankungen) beeinträchtigen den Messwert nicht, da ausschließlich die Frequenz, nicht aber die Amplitude der Schwingung bestimmend ist. Ein Messwerttransport über große Entfernung ist daher ohne Messwertverfälschung durchführbar. Je nach Messaufgabe – statische oder dynamische Größen – kommen Systeme mit intermittierend (Abbildung 2.2) oder dauerschwingender Messsaite (Abbildung 2.3) zur Anwendung.

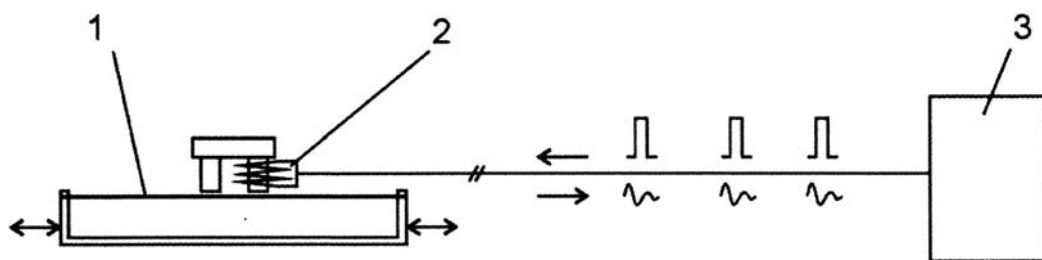


Abbildung 2.2: Intermittierend schwingende Messsaite für statische und quasi-statische Messungen [FECKER, 2004]

- | | | | |
|---|---------------|---|---------------|
| 1 | Messsaite | 2 | Elektromagnet |
| 3 | Empfangsgerät | | |

Die Messsaite wird in einstellbaren Intervallen durch einen Gleichstromimpuls vom Empfangsgerät zur Schwingung angeregt. Gemessen wird während des Ausschwingens der Messsaite. Die Messwerte werden in entsprechenden Intervallen (z. B. 1, 2, 4, oder 8 sec) am Empfangsgerät angezeigt.

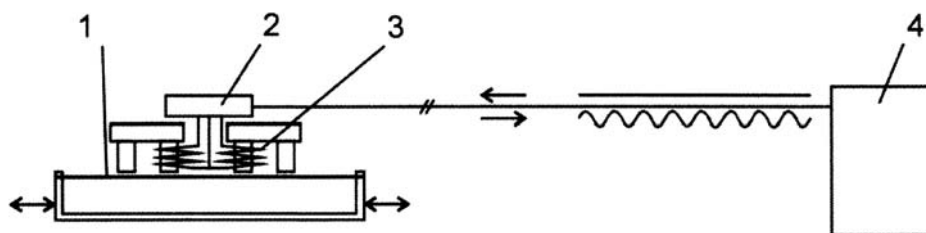


Abbildung 2.3: Dauerschwingende Messsaite (für statische und dynamische Messungen) [FECKER, 2004]

- | | | | |
|---|---------------|---|---------------|
| 1 | Messsaite | 2 | Oszillator |
| 3 | Elektromagnet | 4 | Empfangsgerät |

Bei der dauerschwingenden Messsaite befindet sich diese in einem Oszillatorkreis, der vom Empfangsgerät gespeist wird. Das System enthält zwei Elektromagnete, von denen einer

fortlaufend die Messsaite erregt (Erreger) und der andere fortlaufend die induzierten Schwingungen aufnimmt (Generator). Diese Frequenz wird kontinuierlich am Empfangsgerät gemessen.

Für Dehnungsmessungen an der Oberfläche von Stahl- und Betonbauteilen sowie für die Einbettung in Beton wurden spezielle Dehnungsaufnehmer entwickelt, die den Bedingungen auf der Baustelle gerecht werden.

Eine weitere Möglichkeit Dehnungsmessungen durchzuführen, ist heute durch induktive Wegaufnehmer hoher Präzision in Form eines Druck-Weg-Wandlers gegeben. Die Auflösung dieser Aufnehmer erreicht bereits nahezu diejenige von Dehnungsmessstreifen und ist darüber hinaus für große Dehnwege besonders gut geeignet. Typisches Anwendungsbeispiel solcher Dehnungsaufnehmer mit einer Messbasis von 0,5 m bis 1,0 m und mehr, ist der INDEX-Aufnehmer, der in Betonpfählen für Probelastungen aber auch in Tunneln und Talsperren eingesetzt wird.

Bei allen Verfahren der Spannungsmessung aus Dehnung wird mit Hilfe des E-Moduls bei einachsigem Spannungszustand nach der Beziehung

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

und bei zweiachsigem Spannungszustand nach der Beziehung

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y)$$

die Spannung errechnet. Diesen Verfahren ist der Nachteil gemeinsam, dass vor allem bei dem Beton der E-Modul von der Zusammensetzung und dem Beanspruchungsniveau abhängig und zudem zeitlich veränderlich ist. Bei Böden ist der Schluss von Dehnungen auf Spannungen noch unsicherer.

Außerdem werden bei der Messung von Spannungen im Beton in die Auswertung noch weitere Unsicherheiten durch Dehnungen des Betons hineingetragen, die einerseits überhaupt nicht mit den Spannungen zusammenhängen (Schwinden und Temperaturdehnung), andererseits mit der Spannung in Abhängigkeit von der Zeit verbunden sind (Kriechen). Bei Spannungsmessungen an Bauwerken lassen sich diese Anteile der Betondehnungen ihrer Größe nach meistens auch nicht annähernd angeben und demzufolge aus dem Messergebnis nicht eliminieren (FRANZ, 1958).

Aus diesem Grunde werden seit vielen Jahren Spannungsmessungen mit hydraulischen Druckkissen ausgeführt, die in das Bauteil einbetoniert werden.

2.4.2 Spannungsmessungen

Ein Spannungsgeber besteht aus einem Druckkissen und einer Druckmesseinheit (s. Abbildung 2.4). Damit die Spannungen am Druckkissen nicht durch die meist gedungen

ausgebildete Druckmesseinheit beeinflusst werden, ist diese nicht unmittelbar an das Druckkissen angeschlossen, sondern über eine kurze Druckleitung mit ihm verbunden.

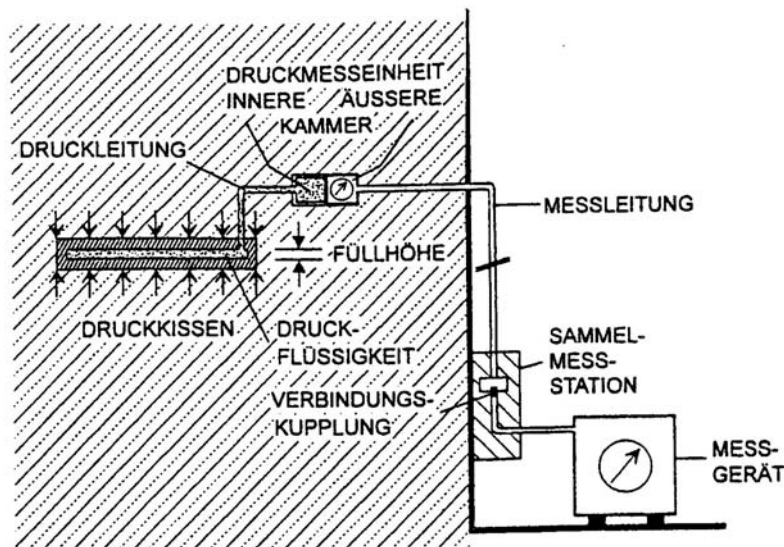


Abbildung 2.4: Messprinzip der Spannungsgeber [PAUL und WALTER, 2004]

Die Druckmesseinheit besteht in der Regel aus einer inneren und einer äußeren Kammer, die eine elastische Membran trennt. Druckkissen, Druckleitung und innere Kammer sind vollkommen mit einer den Druck übertragenden Flüssigkeit (Druckflüssigkeit) gefüllt und bilden ein geschlossenes System. Wird das Druckkissen von außen mit einer Druckspannung belastet, so baut sich im geschlossenen System ein Innendruck auf, der gemessen wird. Dabei können zwei verschiedene Messprinzipien (Deformations- bzw. Kompensationsprinzip) unterschieden werden.

Wenn das Druckkissen eine geeignete Form besitzt, entspricht die Druckänderung in der Füllflüssigkeit des Kissens direkt der Druckänderung im Bauteil. Bei der Einbettung in ein elastisches Medium spielen Länge und Elastizität der Dose in Richtung der zu messenden Spannung eine wesentliche Rolle.

Nachteilig bei dieser Art der Spannungsmessung kann ein Schwindspalt sein, der sich normalerweise zwischen dem hydraulischen Druckkissen und dem Beton, in dem das Kissen eingebettet ist, bildet. Es müssen daher Vorkehrungen getroffen werden, diesen Schwindspalt auszufüllen oder das Kissen selbst vor der Messung nachzufüllen, sodass es satt am Beton anliegt. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass diese Art von Druckmessdosen immer den sog. Totaldruck erfassen, also die mechanische Spannung des Bauteils und z.B. auch den dort im Porenraum herrschenden hydraulischen Druck.

Die Erddruckmessdosen können in zwei Hauptkategorien geteilt werden: Eingebettete-, und Kontaktdruckmessdosen.

Eingebettete Druckmessdosen werden innerhalb eines Bodens installiert, um die Verteilung oder die Größe der Bodenspannungen zu bestimmen [FILZ und BRANDON 1994]. Kontaktdruckmessdosen werden zur Messung der Bodenspannungen, die auf Grenzen von geschütteten Strukturen wirken, verwendet [FILZ und DUNCAN 1993].

2.4.2.1 Spannungsgeber nach dem Deformationsmessprinzip

In Spannungsgebern nach dem Deformationsmessprinzip wird bei Spannungserhöhung Flüssigkeit aus dem Druckkissen in die Druckmesseinheit verdrängt, wo sie die elastische Membran in Richtung der äußeren Kammer verformt (s. Abbildung 2.5).

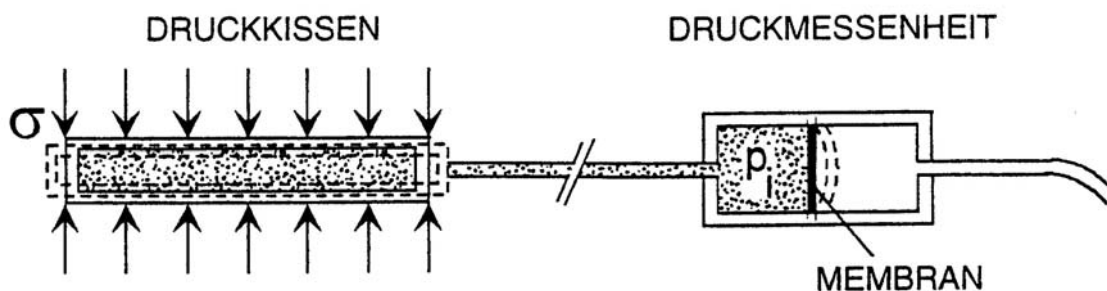


Abbildung 2.5: Spannungsgeber mit Deformationsmessprinzip [PAUL und WALTER, 2004]

Das Ausmaß dieser Verformung wird von der Druckänderung, dem Volumen und der Kompressibilität der Druckflüssigkeit sowie der Steifigkeit der Membran bestimmt. Die Volumenänderung des geschlossenen Drucksystems (Leitung und Messeinheit) ist dagegen vernachlässigbar gering.

Die Verformung der Membran wird mit verschiedenen Verfahren gemessen (s. Abbildung 2.6). Das eingesetzte Messverfahren bestimmt die Genauigkeit, Langzeitstabilität und Temperaturempfindlichkeit der Geber. Die elektrischen Messgrößen von Spannungsgebern nach dem Deformationsprinzip werden vor ihrer Relation zum Innendruck p_i kalibriert.

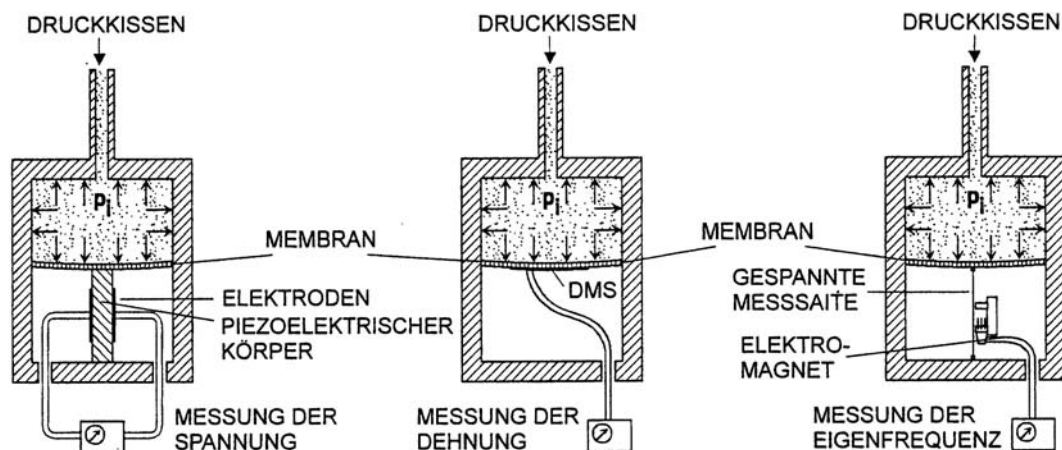


Abbildung 2.6: Druckmesseinheiten nach dem Deformationsmessprinzip (Typ-Beispiele) [PAUL und WALTER, 2004]

2.4.2.2 Spannungsgeber nach dem Kompensationsmessprinzip

Bei der Messung mit Spannungsgebern nach dem Kompensationsprinzip wird die in Abschn. 2.4.2.1 beschriebene Verformung der elastischen Membran durch geeignete Maßnahmen von außen kompensiert (s. Abbildung 2.7). In der Praxis wird hierzu meist der Druck in der äußeren Kammer der Messeinheit hydraulisch oder pneumatisch erhöht und dann mit einem geeigneten Gerät gemessen.

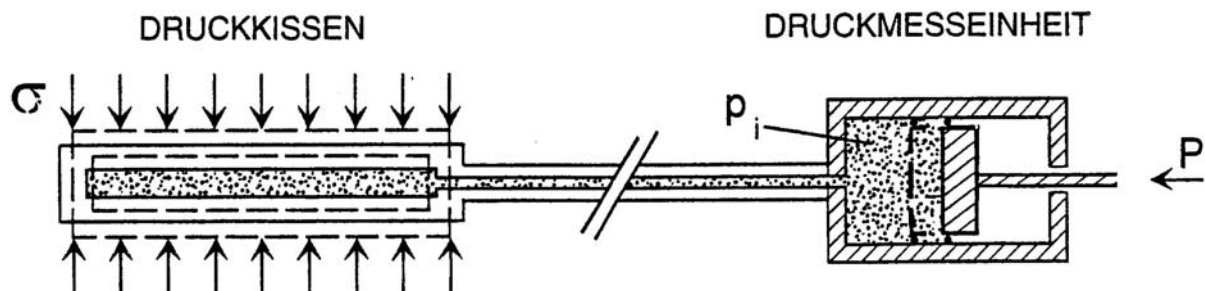


Abbildung 2.7: Spannungsgeber nach dem Kompensationsmessprinzip [PAUL und WALTER, 2004]

Das eingesetzte Messverfahren bestimmt die Genauigkeit dieser Spannungsgeber. Nach dem Messverfahren werden verschiedene Gebertypen unterschieden.

Bei dem in Abbildung 2.8a dargestellten Gebertyp liegt z. B. eine Membran auf der starren perforierten Trennwand zwischen innerer und äußerer Kammer auf. Beim Kompensationsdruck hebt die Membran von der Trennwand ab und gibt den Rücklauf frei. Der Kompensationsdruck ist erreicht, wenn Druckkonstanz und Rückfluss beobachtet wird. In der Praxis beträgt dabei der Abstand zwischen Membran und Trennwand je nach Gebertyp zwischen 2 und 40 μm .

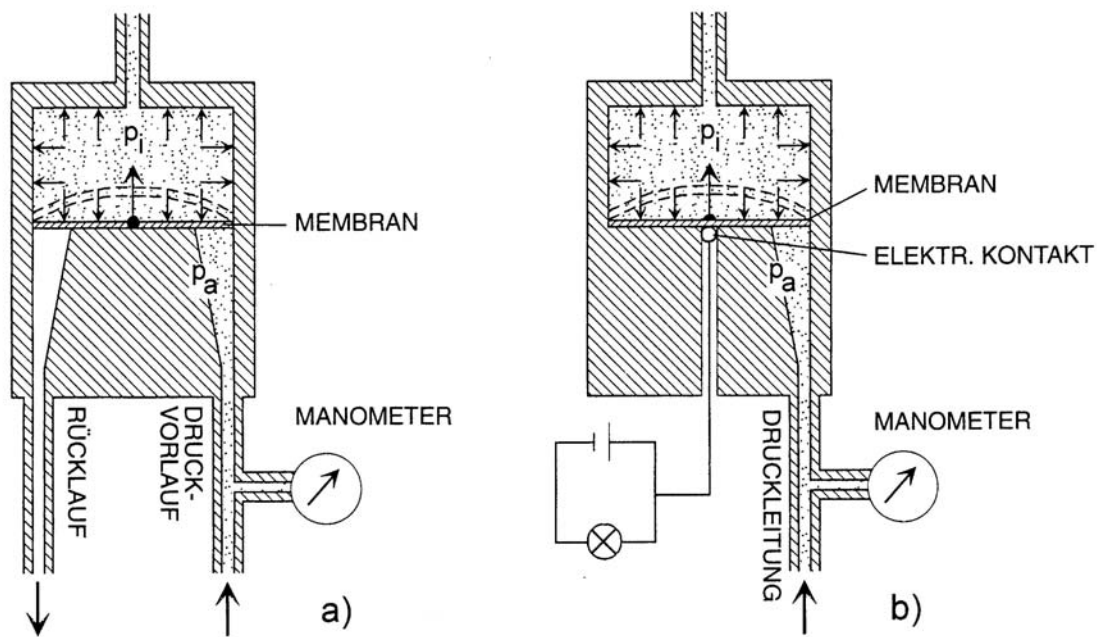


Abbildung 2.8: Geber mit Druckkompensation an der Membran der Messeinheit, a) Geber mit Überdruckventil, b) Geber mit Membranschalter [PAUL und WALTER, 2004]

Bei dem in Abbildung 2.8b dargestellten Gebertyp unterbricht die abhebende Membran beim Kompensationsdruck ihren elektrischen Kontakt zur Trennwand. Dies wird an der Messstation angezeigt.

Bei Spannungsgebern, die im Druckkissen die Kompensation der Zusammendrückung ermöglichen, sind die Zentren beider Kissen mit elektrischen Kontakten ausgestattet (s. Abbildung 2.9). An zwei Kontakten (1a und 1b) liegt eine elektrische Gleichspannung an und zwischen zwei weiteren Kontakten (2a und 2b) wird die Spannungsdifferenz gemessen. Beim Erreichen des Kompensationsdruckes lässt die Kissenaufweitung zwischen den Kontakten beider Seiten einen Spalt entstehen, der durch eine stark vergrößerte Spannungsdifferenz erkannt wird.

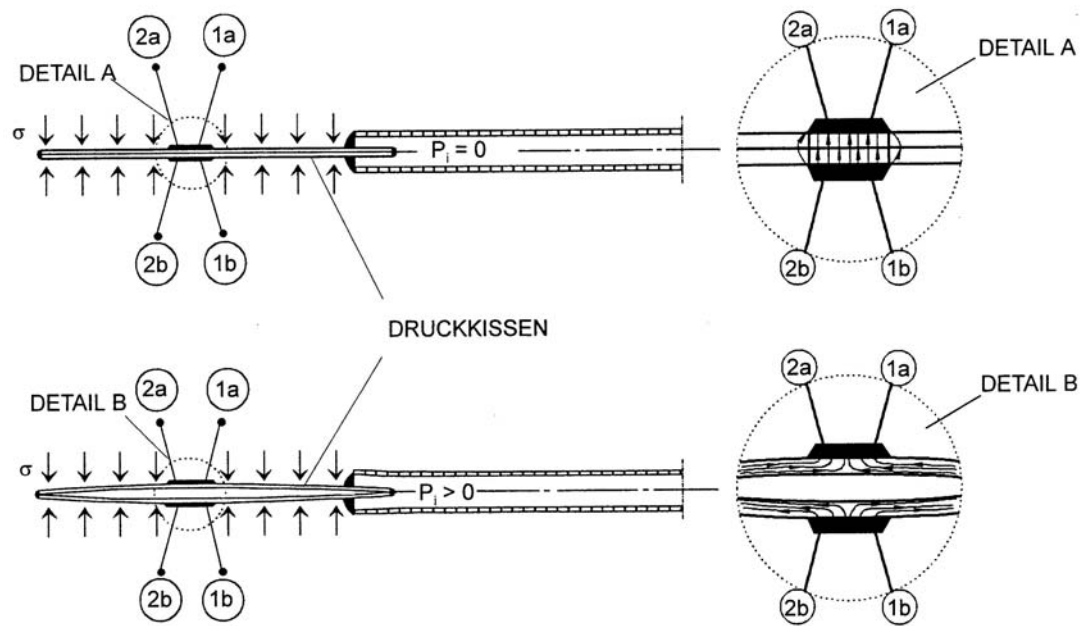


Abbildung 2.9: Spannungsgeber mit Kompensation im Druckkissen [FRANZ, 1958]

2.4.3 Steifigkeit der Spannungsgeber (weicher und steifer Einschluss)

Der Spannungszustand eines Mediums wird von dem eingebauten Druckkissen umso weniger gestört, je geringer das Höhen- zu Breitenverhältnis der Kissen ist. An den Rändern und Ecken der Druckkissen sind Spannungskonzentrationen nicht zu vermeiden; sie können jedoch durch ein geeignetes Design der Kissen minimiert werden.

Die Spannungsgeber sowie ggf. notwendiges Ausgleichs- und Verfüllmaterial sollten in ihrer Steifigkeit dem umgebenden Medium entsprechen. Besitzt ein eingebauter Geber eine höhere Steifigkeit als das umgebende Medium (s. Abbildung 2.10), so konzentrieren sich die Spannungen auf ihn (steifer Einschluss); ist ein Geber dagegen weicher als das umgebende Medium, so muss dieses höhere Spannungen übertragen (weicher Einschluss). Im ersten Fall werden so zu große, im zweiten Fall zu kleine Spannungen beobachtet.

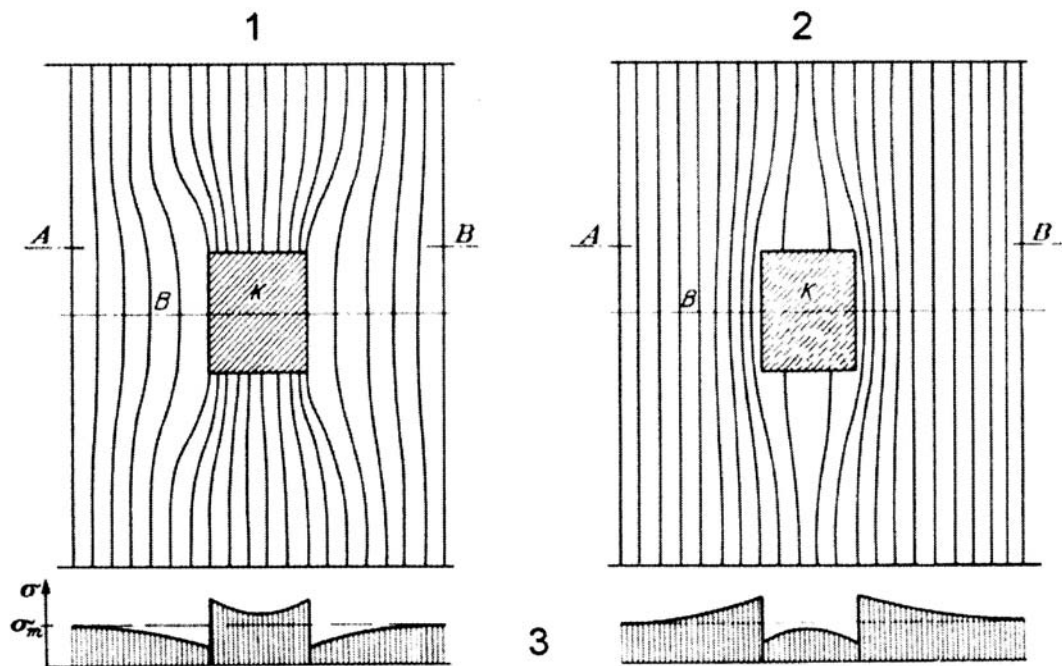


Abbildung 2.10: Verlauf der Druckspannungstrajektorien im Bereich eines eingebauten Messkörpers [Franz, 1958].

- 1 $E_K > E_b$ Messkörper steifer als Beton
- 2 $E_K < E_b$ Messkörper weicher als Beton
- 3 Spannung in Schnitt A-B

Die Verformbarkeit eines Spannungsgebers ist durch seine auf die Kissenfläche bezogene Normalsteifigkeit gekennzeichnet. Diese wird durch [PAUL und WALTER, 2004]

- das Messprinzip und die Größe des Gebers,
- die Füllhöhe, das Volumen und die Kompressibilität der Druckflüssigkeit sowie
- die Verformbarkeit der Wandung des geschlossenen Drucksystems bestimmt.

Bei Spannungsgebern mit geschlossenem Drucksystem wird eine hohe Systemsteifigkeit angestrebt.

Für Kissen zum Einsatz in steifen Prüfmedien (Elastizitätsmodul > 30 GPa) kann als Druckflüssigkeit das gering kompressible Quecksilber verwendet werden. Hierbei sind jedoch die Belange des Umweltschutzes zu beachten. Verschmutzung kann besonders dann eintreten, wenn die Geber am Ende der Messzeit nicht ausgebaut oder entleert werden. Ist die Verwendung von Quersilber nicht zugelassen, so muss Hydrauliköl, das eine höhere Kompressibilität aufweist, verwendet und der Spannungsgeber vorgespannt werden.

Bei Prüfmedien geringer bis mittlerer Steifigkeit (Elastizitätsmodul < 30 GPa) ist generell Hydrauliköl als Druckfestigkeit zu verwenden. Die Systemsteifigkeit kann dann mittels Vorspannung in geringem Umfang erhöht werden. Bei kriechfähigen Prüfmedien wirkt sich eine geringe Steifigkeit des Spannungsgebers kaum auf das Messergebnis aus.

Bei Spannungsgebern mit geschlossenem Drucksystem muss gewährleistet sein, dass die beiden Kissenbleche stets vollständig durch die Druckflüssigkeit getrennt sind. Bei Spannungsgebern, die unmittelbar im Druckkissen die Kompensation ermöglichen, liegen die beiden Stahlbleche des Druckkissens im Einbau und Normalzustand unmittelbar aufeinander. Die Steifigkeit solcher Kissen entspricht damit der von Stahl. Zur Vermeidung eines steifen Einschlusses sollten sie deshalb bevorzugt in steife oder kriechfähige Prüfmedien eingebaut werden.

2.5 Einbau der Spannungsgeber

2.5.1 Erddruckmessgeber

Drei Methoden sind für den Einbau der Druckmessdosen im Boden bekannt. Bei der ersten Methode [HORN et al., 1989] wird zunächst eine senkrechte Baugrube erstellt. Von dieser Baugrube aus wird dann in horizontaler Richtung ein Bohrloch, bis zu der Stelle, an der die Bodenspannungen gemessen werden sollen, erstellt. In dieses Bohrloch wird die Druckmessdose eingebaut.

Bei der zweiten Methode [HARRIS und BAKKER, 1994] wird ebenfalls wie bei Methode eins, ein Bohrloch erstellt, allerdings mit einem größeren Durchmesser als der, der Druckmessdose. Nach dem Installieren der Druckmessdose wird das Bohrloch mit dem gewonnenen Bohrgut wieder verfüllt.

Die dritte Methode betrifft gestörte Böden entweder als Folge von Ackerbau [BLUNDEN et al., 1994] oder Benutzung von wiederverpackten Böden im Bodenbehälter [KIRBY et al., 1997, BAILEY et al., 1988, BLOCK et al., 1995, PEARMAN et al., 1996]. Der Messgeber wird in diesem Boden entweder durch Wiederverpackung oder beim Wiedereinbau des Bodens, installiert.

Die ersten zwei Methoden von Installierungen der Messdosen können zu einem gestörten Umgebungsbereich rund um die Druckmessdose führen, der die Messung der Spannungen beeinflussen kann. Diese Ummantelungen können steifer oder weicher als des Bodens sein.

2.5.2 Gebirgsspannungsgeber

Sollen Spannungsänderungen im Gebirge gemessen werden, so werden die Spannungsgeber je nach Festigkeit des Gesteins entweder eingedrückt oder in Bohrlöchern installiert. Die Bohrlöcher sind möglichst gebirgsschonend herzustellen. Der Bohrdurchmesser ist auf die Größe des Gebers abzustimmen. Die Spannungsgeber werden zentriert und mit Hilfe eines Gestänges richtungs- und tiefenorientiert eingebaut. Der Raum zwischen den Spannungsgebern und der Bohrlochwand wird bei Fels hoher Steifigkeit vollständig mit fließfähigem Zementmörtel oder mit Zementsuspension verfüllt. Zum Erzielen eines möglichst guten Formschlusses kann dabei ein expandierender Stoff zugesetzt oder

eine Nachverpressung durchgeführt werden. Bei vergleichsweise weichen Druckkissen kann ein guter Formschluss nach dem Einbau auch durch Aufweitung erreicht werden.

Bei Fels mittlerer oder geringer Steifigkeit kann auch Gips, Ton-Bindemittelgemisch oder Kunststoff als Verfüllstoff verwendet werden. Es ist dabei jedoch zu gewährleisten, dass die Steifigkeit des erhärteten Verfüllmaterials nicht geringer als die Steifigkeit des ungestörten Gebirges ist.

Sollen Spannungsgeber in das Gebirge eingedrückt werden, so müssen sie mit einer Eindringsschneide versehen sein und eine besonders hohe Formstabilität besitzen. Bei diesem Einbauverfahren wird auch ohne Verfüllstoff meist ein guter Formschluss erzielt.

2.5.3 Kontaktspannungsgeber

Kontaktspannungsgeber werden möglichst formschlüssig auf die vorhandene Kontaktfläche (Auflagermedium) montiert. In der Regel ist hierzu eine Ausgleichsschicht aus Zementmörtel oder ähnlichem erforderlich. Danach wird die zweite (meist Beton) gleichmäßig und formschlüssig auf das Druckkissen aufgebracht (s. Abbildung 2.11). Damit der Spannungsgeber dabei seine Lage nicht verändert, ist er vorher mit einzementierten Stahlstäben oder Nägeln etc. zu fixieren. Hinweise zum Einbau finden sich in den Bedienungsanleitungen der Herstellerfirmen.

Wird Spritzbeton aufgetragen, so ist darauf zu achten, dass die Spannungsgeber nicht durch den Spritzstrahl verschoben und Spritzschatten vermieden werden. Vom Düsenführer erfordert dies eine erhöhte Aufmerksamkeit; er sollte diesbezüglich erfahren oder besonders eingewiesen sein.

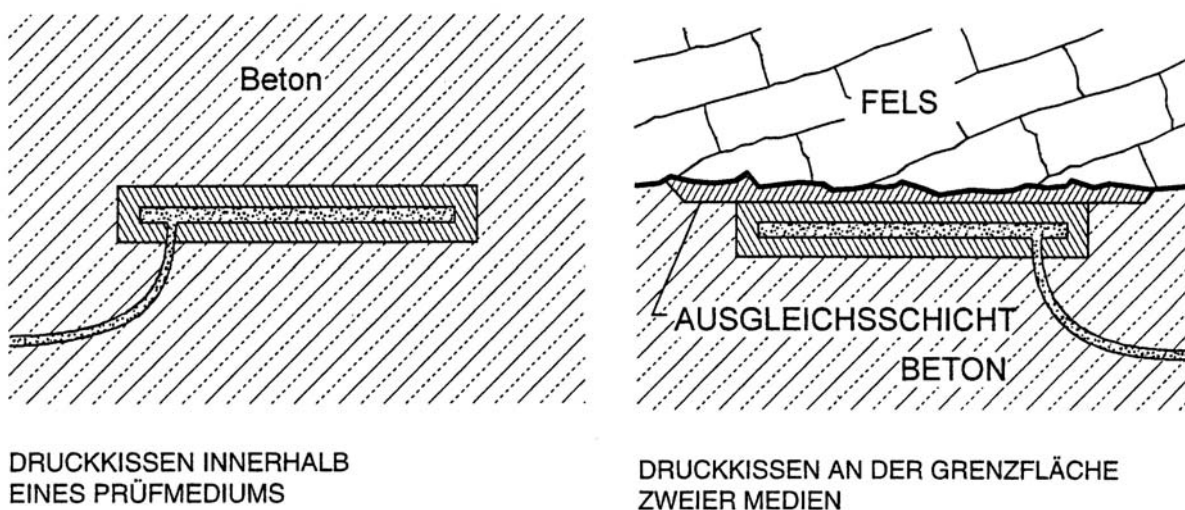


Abbildung 2.11: Einbau von Spannungsgebern [PAUL und WALTER, 2004]

2.5.4 Betonspannungsgeber

Für Betonspannungsmessungen werden in der Regel Spannungsgeber mit Nachspannröhrchen verwendet (s. Abbildung 2.12). Das Nachspannröhrchen muss so verlegt werden, dass es vor Beschädigung geschützt wird und zum Nachspannen zugänglich ist.

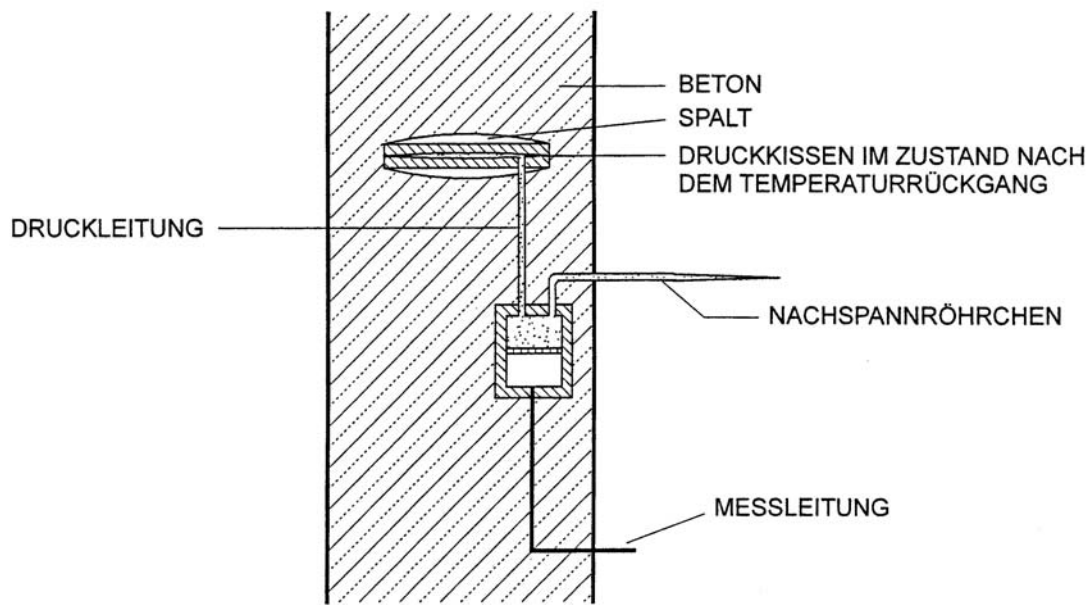


Abbildung 2.12: Betonspannungsgeber mit Nachspannröhrchen [PAUL und WALTER, 2004]

Beim Abbinden des Betons tritt stets Hydratationswärme auf, die auch auf das Druckkissen wirkt. Dieses weitet sich auf und verformt den noch nicht ausgehärteten Beton plastisch. Mit fortschreitendem Abbinden geht die Temperatur zurück und die Höhe des Druckkissens verringert sich. Es bleibt ein Schrumpfspalt zurück. Dieser muss durch Nachspannen des Druckkissens geschlossen werden.

Wenn Spannungsgeber in dickwandige Betonteile eingebaut werden und diese bereits soweit abgebinden haben, dass ein Messvorgang sie nicht bleibend verformt, kann das weitere Abbinden des Betons durch Messungen beobachtet werden. Fällt der Messwert des Gebers deutlich ab und kann dies nicht mit Besonderheiten des Baugeschehens erklärt werden, so ist davon auszugehen, dass sich zwischen dem Druckkissen und dem Beton ein Schrumpfspalt ausgebildet hat und der Spannungsgeber nachgespannt werden sollte. Eine Wiederholung des Nachspannens kann erforderlich sein.

Zur Nachspannung von Betonspannungsgebern wird das Nachspannröhrchen mit einer Abquetschzange vom äußeren Ende her schrittweise gequetscht und die jeweilige Spannungsänderung gemessen. Dies wird fortgeführt, bis aus den Messergebnissen ein linearer Druckanstieg erkennbar ist und zumindest der Referenzdruck erreicht ist. Im Tunnelbau sind Drücke zwischen 0,1 und 0,4 MPa üblich. Der nach dem Nachspannen

gemessene Geberdruck stellt für die Folgemessungen den korrigierten Referenzdruck, P_0 , dar.

Im Folgenden wird der Einsatz der Messdosen im Beton erläutert [GLÖTZL 2001]:

Zu diesem Zweck stehen Geber mit Ölfüllung oder in Ausnahmen mit Quecksilber mit verschiedenen Belastungshöhen zur Verfügung.

Beim Abbinden des Betons entsteht eine Abbinde­temperatur, die ebenfalls auf die Geber einwirkt.

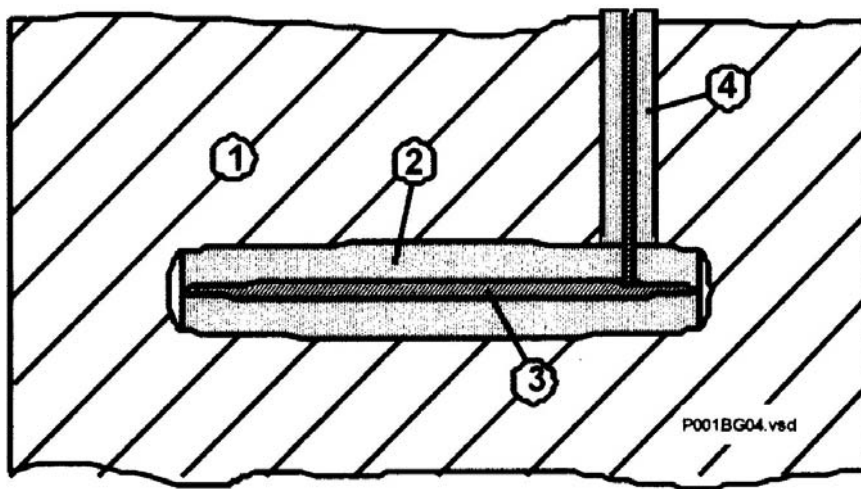


Abbildung 2.13-1: Betonspannungsgeber im Beton eingebaut.

- | | |
|------------------------|--|
| (1) Beton | (2) Druckkissen |
| (3) Druckkissenfüllung | (4) Verbindungsrohr Druckkissen - Ventil |

Der kubische Wärmeausdehnungskoeffizient von Quecksilber beträgt 0,000181, während er bei Öl ca. 0,001 beträgt. Das heißt, die Geberfüllung und damit auch das Druckkissen dehnen sich infolge der Abbinde­temperatur. Da der Beton noch nicht ausgehärtet ist, gibt dieser ebenfalls nach.

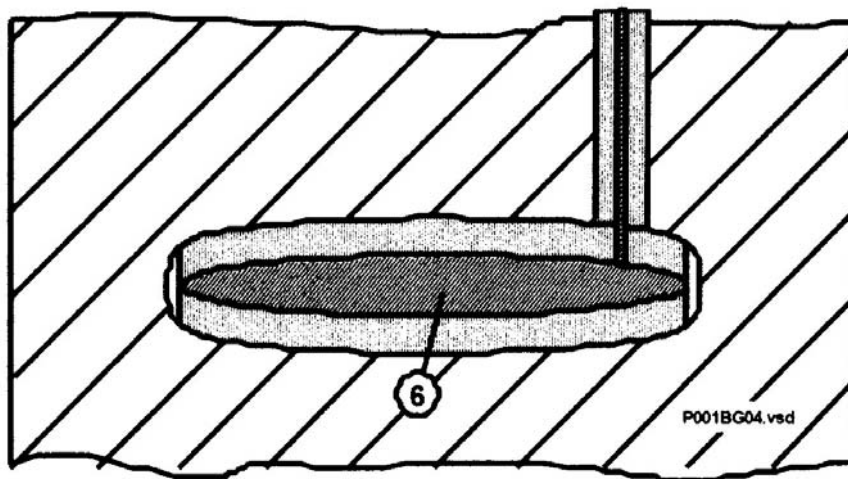


Abbildung 2.13-2: Betonspannungsgeber im erwärmten Zustand.

(6) Erwärmte Druckkissenfüllung. Nach dem Abbinden des Betons geht die Temperatur wieder zurück, das Druckkissen zieht sich zusammen

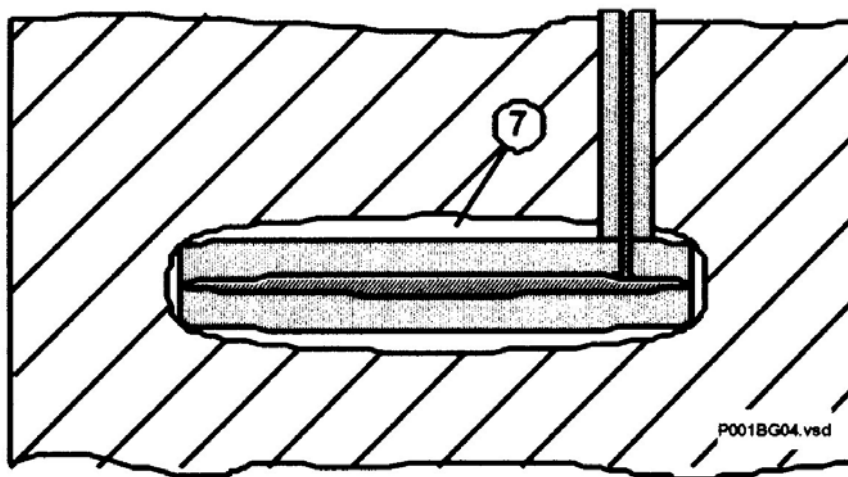


Abbildung 2.13-3: Betonspannungsgeber nach dem Temperaturrückgang.

(7) Spalt zwischen Beton und Druckkissen. Dadurch entsteht ein Hohlraum. Es besteht also kein vollständiger Kontakt mehr zwischen dem Druckkissen und dem Beton, Gewölbewirkung tritt ein. Aus diesem Grunde benutzt man Geber mit Nachspannrohr.

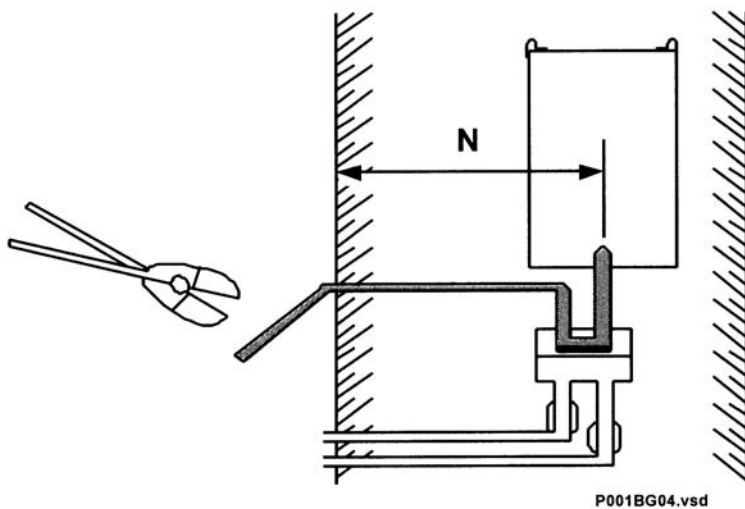


Abbildung 2.13-4: Ventilgeber mit Nachspannrohr "N"

Das an der Schalung anliegende Ende des Nachspannrohres wird zuvor mit einer Umhüllung (mit Papier oder ähnlichem) versehen. Nach dem Erhärten des Betons und nach dem Abkühlen sowie der Belastung wird das an der Schalung anliegende

Teil herausgebogen und vom Ende her zusammengequetscht. Dazu wird ein umgebauter Bolzenschneider mit Klemmbacken benutzt.

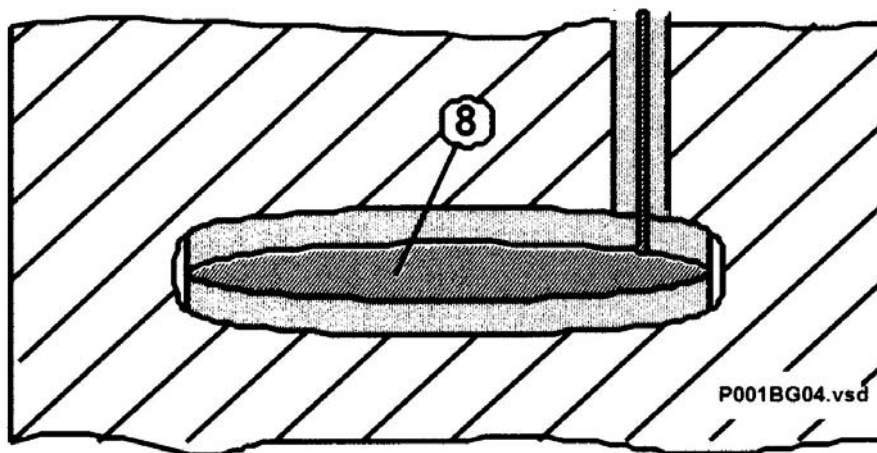


Abbildung 2.13-5: Geweitetes Druckkissen durch Nachspannen.

Mit Hilfe des Nachspannrohres nachgepresste Druckkissenfüllung.

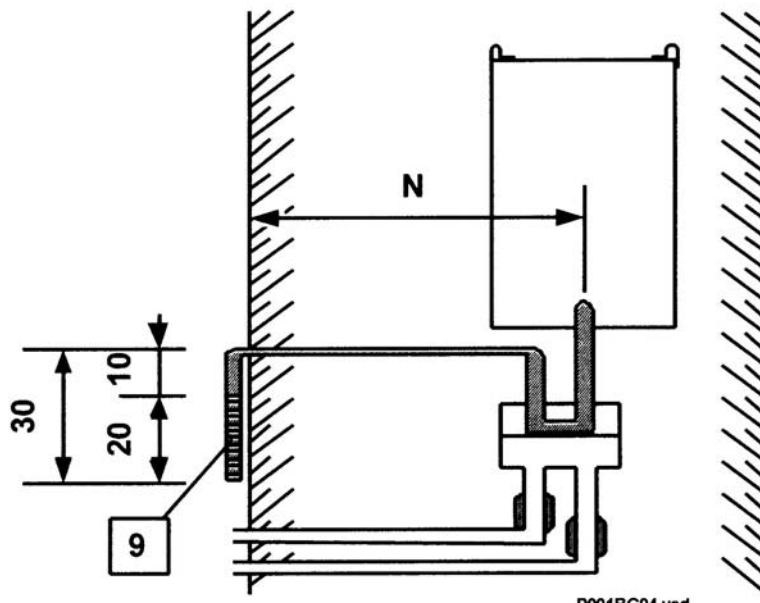


Abbildung 2.13-6: Betonspannungsgeber mit Nachspannrohr.

(9) Abgequetschte Länge. Das Maß für die zusammenzuquetschende Länge des Nachspannrohres ist natürlich jeweils verschieden groß, da die Spaltbildung unterschiedlich sein kann (Skizze II). Durch das Abquetschen des Nachspannrohres wird die darin befindliche Öfüllung (Quecksilberfüllung) in das Druckkissen gedrückt.

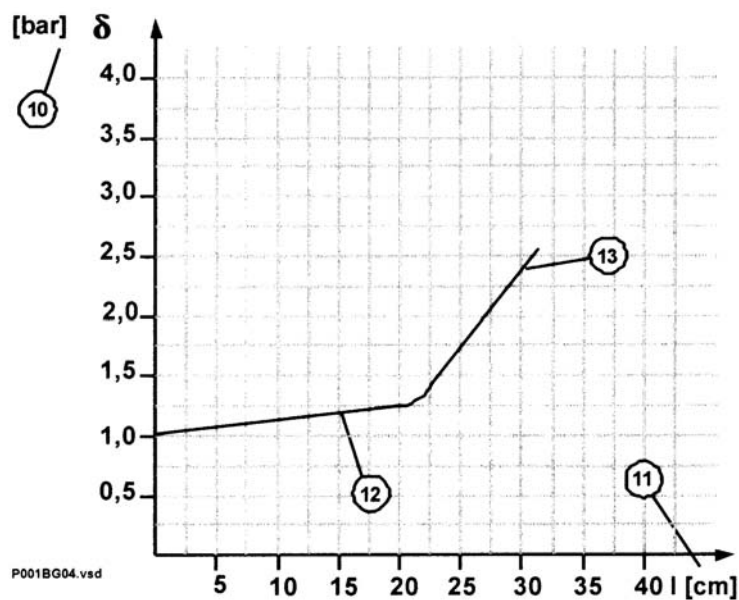


Abbildung 2.13-7: Messdiagramm beim Abquetschen.

- (10) Abgelesene Spannung an der Pumpe
- (11) Gequetschte Länge des Rohres
- (12) Anstieg der Vorspannung durch die zusätzliche Füllmenge im Druckkissen. Dabei findet noch kein vollständiger Kontakt des Druckkissens mit dem Beton statt
- (13) Starker Anstieg der abgelesenen Spannung beim Kontakt mit dem Beton.

Das Abquetschen des Nachspannrohres muss unter ständigem Beobachten der Anzeige an der Pumpe erfolgen, um den starken Anstieg der Spannung (13) rechtzeitig zu bemerken.

Der Betonspannungsgeber mit Nachspannrohr ist aus den genannten Gründen im Allgemeinen zu empfehlen.

Durch das Nachverpressen wird eine vollständige Bettung erreicht bzw. nachgewiesen.

2.5.5 Herstellung von Spannungsmessquerschnitten

Im Felshohlraumbau werden Spannungsmessquerschnitte meist mit einer Vielzahl von Spannungsgebern eingerichtet. Diese dienen, z. B. in der Auskleidung von Hohlraumquerschnitten, der Beobachtung von Spannungsverteilungen (s. Abbildung 2.14).

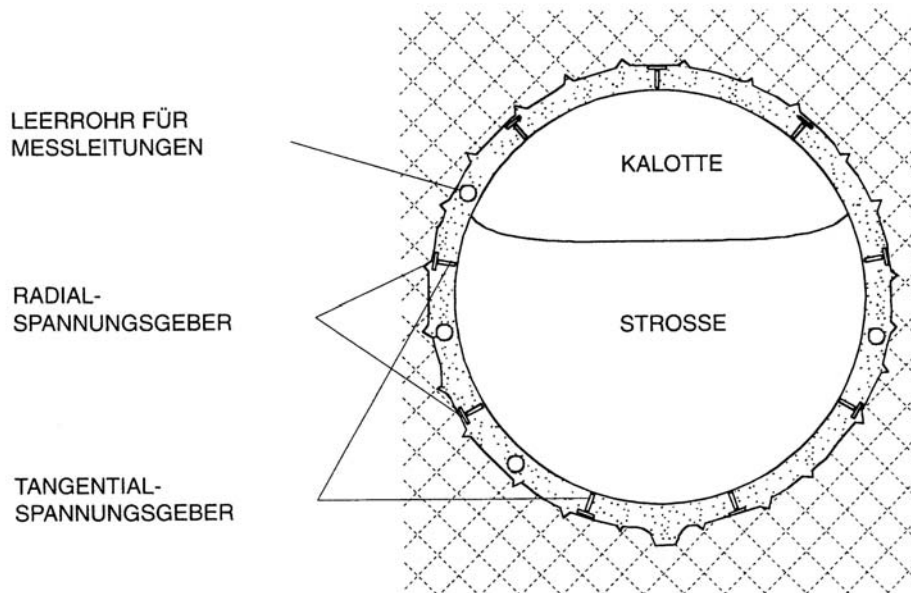


Abbildung 2.14: Tunnelmessquerschnitt mit Radial- und Tangentialspannungsgebern [PAUL und WALTER, 2004]

Die Messleitungen von den Spannungsgebern zur Sammelmessstation müssen vor mechanischer Beschädigung geschützt werden. So ist bei der Planung und Ausführung von Messquerschnitten zu bedenken, dass der Ausbruch und die Sicherung von Felshohlräumen meist im Teilvortrieb erfolgt (z. B. vorseilender Kalottenvortrieb, nachfolgender Strossenvortrieb). Die Messleitungen müssen deshalb so verlegt werden, dass sie durch die Vortriebsarbeiten nicht beschädigt werden können. Innerhalb der Betonauskleidung können die Messleitungen in Leerrohren verlaufen.

Bei benachbarten Ausbauabschnitten unterschiedlicher Steifigkeit, z. B. beim Wechsel von Stahlbogenbewehrung zu Mattenbewehrung oder bei Querschnittsänderungen, kann es zur Konzentration der Spannungen auf die steiferen Querschnitte kommen. Allgemein sollten Messquerschnitte daher in ausreichendem Abstand von solchen Übergängen angeordnet

werden. Bei Abständen von mehr als zwei Ausbruchdurchmessern ist die Beeinflussung vernachlässigbar gering.

2.6 Durchführung der Messung

Der Messbereich eines Spannungsgebers ist nach unten durch die minimale Prüfspannung (Vorspanndruck, p_v) und nach oben durch die Lastkapazität des Gebers (Gebernendruck) bzw. die Maximalspannung begrenzt. Der Vorspanndruck ist in Abhängigkeit vom Typ des Spannungsgebers und der Steifigkeit des Prüfmediums zu wählen (s. Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Erforderliche minimale Prüfspannung (Vorspanndruck P_v) [PAUL und WALTER, 2004]

Elastizitätsmodul des Prüfmediums [MPa]	Minimale Prüfspannung (Vorspanndruck) [MPa]
Gering (<5000)	0,05
Mittel (5000 bis 30000)	0,10
Hoch (>30000)	0,50

Zwischen ca. 20% und 80% des Gebernendruckes können Spannungsänderungen erfahrungsgemäß mit einem Fehler von < 5 % des Gebernendruckes gemessen werden. Jenseits dieser Grenzen ist die Messgenauigkeit geringer.

Unmittelbar nach dem Einbau der Spannungsgeber, d. h. noch vor dem Auftragen bzw. Einbringen des Betons, ist eine Funktionsprüfung aller eingebauten Geber durchführen. Hierbei ist festzustellen, ob der Messwert des Gebers, P_G , unter Berücksichtigung der hydrostatischen Druckdifferenz zwischen der Einbau- und der Messstelle, P_H , sowie dem Druckverlust in der Leitung, P_L , dem Vorspanndruck, P_v , des geschlossenen Systems entspricht.

$$P_G = P_v + P_H + P_L \quad (2.1)$$

Nachdem der Beton soweit abgebunden hat, dass er beim Messvorgang durch die geringfügige Aufweitung des Druckkissens keine bleibende Verformung erleidet, kann die Referenzmessung durchgeführt werden. Der dabei ermittelte Referenzdruck, P_0 , ist der erste, mit dem vollständig eingebauten Spannungsgeber gemessene Wert. In den Folgemessungen werden die Drücke, P_i , bestimmt. Die zu ermittelnde Spannungsänderung, $\Delta\sigma$, ergibt sich aus der Druckdifferenz als

$$\Delta\sigma = P_i - P_0 \quad (2.2)$$

Spannungen sind in der Dimension entsprechend MN/m^2 anzugeben. Es sind Spannungsänderungen, $\Delta\sigma < 0$, möglich; sie weisen auf eine verminderte Einspannung des Druckkissens hin.

In der Regel wird bereits bei der Planung die zeitliche Abfolge der Messungen festgelegt. Sie richtet sich nach dem Ablauf der Bauarbeiten und orientiert sich am Messzweck. Die Messungen sind möglichst immer von derselben mit der Messtechnik vertrauten Person und entsprechend den Anweisungen des Gerätherstellers durchzuführen. Die Messgeräte müssen in zeitlichen Abstand von ca. 12 Monaten kalibriert werden. Vor jedem Messzyklus ist das Messgerät zu überprüfen.

Die Messungen können manuell oder automatisch erfolgen. Zum manuellen Messen wird ein tragbares Gerät an eine Sammelmessstation angeschlossen. Die Drücke der verschiedenen Spannungsgeber können dann nacheinander gemessen werden. Automatische Meßsysteme, die ständig mit einer oder mehreren Sammelmessstationen verbunden sind, erlauben Fernabfragen mit kurzen Messintervallen, elektronische Datenerfassung und Alarmfunktionen.

Nach der Messung ist zu überprüfen, ob gegenüber der vorherigen Messung signifikante Veränderungen der Messwerte eingetreten sind bzw. die gemessenen Werte aus dem Bauablauf erklärlich sind. Falls an der Richtigkeit der Messung Zweifel bestehen, ist der technische Zustand der Messgeräte zu prüfen (z. B. Verschmutzung von Leitungen) und die Messung zu wiederholen.

Bei Handmessung sind die Messergebnisse vor Ort in vorbereitete Protokolle einzutragen. Bei Tunnelbauten ist in jedem Messquerschnitt auch die Gesteins- bzw. die Betontemperatur zu messen und zu protokollieren. Ferner ist der Bauzustand in Stichworten im Messprotokoll anzugeben. Zur Interpretation der Ergebnisse von Spannungsänderungsmessungen sind im Tunnelbau auch noch folgende Angaben wertvoll:

- Öffnung von Tunnelflächen, Verschiebung in Scherzonen sowie andere geotechnische Besonderheiten, die auf Spannungsänderungen im Gebirge schließen lassen.
- Beobachtung von Unterprofilen Auflockerungs- und Störungszonen
- Risse in Betonauskleidung (Rissbreite, Risslänge, Relativbewegungen)
- Überbeanspruchung von Sicherungsmitteln, z. B. Felsnägeln oder Ankern, Stahlbögen, Keilen, Verzugsblechen o. ä.
- Veränderungen in der Bergwasserführung

3 Auswirkende Parameter auf die Messergebnisse

3.1 Einführung

Eine Druckmessdose, die mechanisch gut ausgeführt und auch installiert ist, kann nicht garantieren, dass die gemessene Spannung dem Primärspannungszustands entspricht.

Theoretische Untersuchungen, vorgenommen von vielen Forschern, haben die kritischen Parameter in Design und Herstellung von Druckmessdosen aufgezeigt. Werden die Messgeräte exakt geplant, hergestellt und das korrekte Model ausgewählt, bleibt das Problem, wie es benutzt werden soll.

Ein Weg diese Situation zu verbessern, ist es das Design der Messinstrumente an das Material anzupassen, in welches sie eingebettet werden sollen. Das bedeutet, dass das Instrument aus einem Material bestehen muss, dessen E-Modul ähnlich dem des umgebenen Materials ist. Außerdem sollte die Größe an die Korngröße des umgebenen Materials angepasst sein. Des Weiteren sollte die Geometrie so gewählt werden, dass Spannungskonzentration und Gewölbewirkung minimiert werden.

Das ist zum einen sehr schwer zu realisieren und zum anderen sehr teuer; deshalb wird basierend auf den drei folgenden Punkten eine praktische Methode um glaubwürdige Spannungsmessungen zu erhalten empfohlen [BRUZZI und ZATTONI, 1999]:

1. Kontrolle der Instrumentherstellungsprozesse
2. Kalibrierungsmaßnahme zum Einsatz in In situ Versuche
3. Feldinstallierungsmaßnahmen

Die Hauptfaktoren, die bei der Verwendung der Druckmessdosen betrachtet werden sollen, sind die Geometrie und die mechanischen Eigenschaften von Messdosen.

- Die Messdose soll möglichst Flach sein
- Die Messoberfläche soll möglichst groß sein
- Das Steifigkeitsverhältnis Boden/Messdose soll möglichst 1 sein
- Die Verformung der Messfläche soll möglichst klein sein

Es ist akzeptiert, dass die Totalspannungsmessung in feinkörnige Böden einfacher ist, weil das Verhältnis der Messdosenfläche zur Korngröße groß ist.

Das am häufigsten gebrauchte Instrument zur Messung von Bodenspannungen ist die hydraulische Druckmessdose.

Jeder, der das Problem von Spannungsmessung kennt, hat auf die Wichtigkeit eines richtigen Kontaktes zwischen dem Medium und der Fläche der Dose hingedeutet. Einheitliche Spannungsverteilung auf die Messdosenfläche kann nicht nur wegen des

wölbenden Effekts sein, sondern auch wegen nicht kontinuierlichen Kontakts zwischen Boden und Diaphragma.

Die Interpretation der Messung basierend auf einfachen Wasserspannungskalibrierungsversuch gibt nur relative Spannungswerte an. Es ist daher zwingend notwendig, zur genauen Bestimmung des Spannungszustandes im Boden Feldkalibrierungsversuche durchzuführen.

3.2 Auswirkende Faktoren auf die Ergebnisse des Spannungsgebers im Boden

Die mit Spannungsgebern erzielbare Messgenauigkeit hängt von dem verwendeten Typ, einer geeignet gewählten Normalsteifigkeit, der Einbauqualität, den Einbaubedingungen, der Steifigkeit des Prüfmediums, der Kalibrierung und dem Betrag der zu messenden Spannungsänderung ab.

HVORSLEV (1976), SELIG (1964), und WEILER und KULHAWY (1978, 1982) berichten von Untersuchungen der wirksamen Einflussfaktoren auf Spannungsmessungen mit Erddruckmessdosen.

Nach WEILER und KULHAWY (1982), können die Einflussfaktoren auf die Ergebnisse der Druckmessdosen in drei Hauptkategorien eingeteilt werden: (1) die Eigenschaften der Druckmessdose; (2) Eigenschaften des umgebende Bodens; und (3) Umweltbedingungen. Die ersten zwei Kategorien sind nicht ganz trennbar; die Interaktion zwischen der Dose und dem Boden ist keine direkte Summation von Eigenschaften jedes Element des Systems. Die erste Kategorie ist nur wegen ihrer Inhaltfehlers, die bei zweckmäßigem Messdosendesign kontrolliert werden können, erkennbar.

Es gibt jedoch eine Vielzahl von Projekten, bei denen eine Anpassung äußerst schwierig ist, zumal wenn mehrere Druckdosen anscheinend gleiche, systematische Abweichungen aufweisen. Eine Anpassung einzelner Werte an eine Gruppe von Werten ist in jedem Fall nachvollziehbar, die Änderung aller Werte wirft jedoch immer Fragestellungen auf, da die gewählten Bezugswerte vom Bearbeiter subjektiv gewählt wurden. Als Beispiel hierfür sind in Abbildung 3.1 die gemessenen Spannungen unter einem Hochhaus dargestellt. Zur einfacheren Anschaubarkeit wurden gemessene Drücke, die einen vergleichbaren Verlauf aufwiesen, aus der Grafik herausgenommen. Erster Ansatz bei der Auswertung war, dass die Druckmessdosen defekt sind und falsche Werte liefern, da nach Lastaufbringung teilweise Negativdrücke auftraten und in anderen fällen signifikant zu hohe Lasten gemessen wurden. Beim Abstellen der Wasserhaltung jedoch wurde deutlich, dass die Messgeber den Anstieg um 4,0 m Wassersäule exakt darstellen. Eine Funktionsfähigkeit der Druckmessdosen konnte damit nachgewiesen werden. Eine Anpassung der Werte ist aufgrund des gewählten Gründungskonzeptes nicht ausführbar.

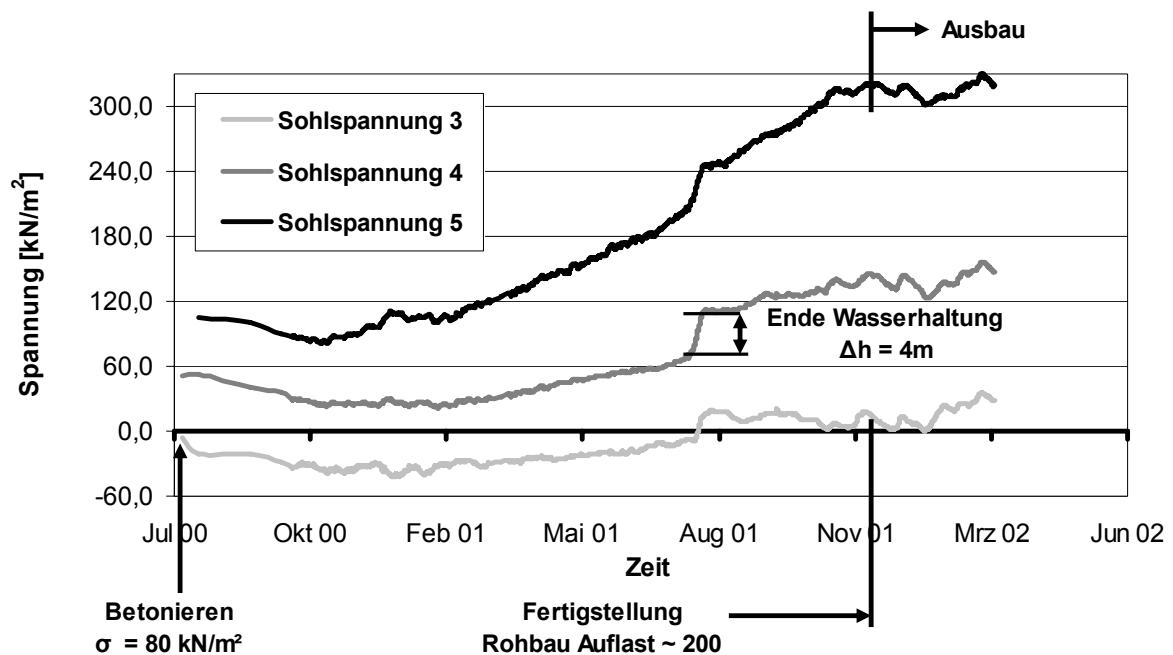


Abbildung 3.1: gemessene Sohlspannung unter einem Hochhaus

Deutlich erkennbar ist, dass einige Werte nach Betonieren der Fundamentplatte ($d = 3,5 \text{ m}$) signifikant zu hohe oder negative Werte aufweisen, einzig zwei Messwerte (DMD 4, 5) liegen in einem akzeptable Bereich, weisen jedoch Abweichungen von ca. 25% auf. Mit Kenntnis der anderen Messwerte muss jedoch auch die Richtigkeit dieser beiden Werte angezweifelt werden.

3.2.1 Spannungsgebereigenschaften und Geometrie

Das Dosendesign hat einen entscheidenden Einfluss auf die gemessenen Spannungen im Boden. Hauptfaktoren sind dabei der Aufbau der Druckmessdose und ihre Geometrie. Bei der Beschaffung können nicht alle Randbedingungen berücksichtigt werden. Deshalb sind bei späteren Auswertung Korrekturfaktoren zu berücksichtigen.

- **Spannungsverteilung auf die Spannungsgeber**

Im folgendem werden die Messgeräte und ihre Bauteile soweit beschrieben, wie es zum Verständnis der Messprinzipien, der Fehlerquellen und der verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten von Bedeutung ist.

Druckkissen bestehen aus zwei Stahlblechen, die an den Rändern druckdicht miteinander verbunden sind. Die Form der Druckkissen kann rechteckig, eckengerundet, oval oder rund sein. Die üblicherweise zur Messung von Spannungsänderungen eingesetzten Druckkissen sind je nach Anwendungszweck zwischen 5 und 12 mm hoch und haben Kantenlängen bzw. Durchmesser von 100 bis 400 mm. Spannungsgeber, die unmittelbar im Druckkissen die Kompensation ermöglichen, sind meist nur etwa 0,5 mm hoch und haben ca. 50 mm Durchmesser.

Am Kissenrand stellen Ecken und Schweißnähte vergleichsweise steife Elemente dar. Nach dem Einbau können an diesen Stellen deshalb erhöhte Spannungen auftreten (s. Abbildung 3.2a). Besonders bei kleinen Druckkissen können so Spannungen durch Gewölbewirkung auf den steifen Kissenrand abgetragen werden (s. Abbildung 3.2b).

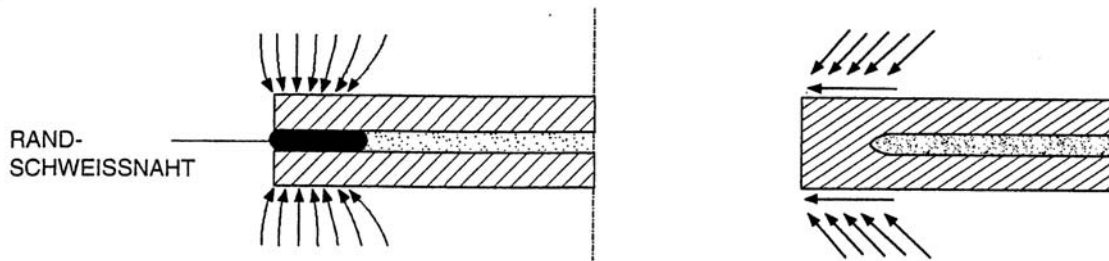


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Spannungsverteilung an einem Druckkissen, a) Spannungskonzentration, b) Gewölbewirkung am Rand eines Druckkissens [PAUL und WALTER, 2004]

Beide Phänomene haben zur Folge, dass die zu erfassende Spannung nicht in vollem Maße auf die sensitive Kissenmitte wirkt. Bei kleinen Druckkissen sind deshalb abgerundete den eckigen Formen sowie Druckkissen ohne Randschweißnaht vorzuziehen (s. Abbildung 3.3a). Es werden vorwiegend Kissen mit einer Randnut eingesetzt. Diese reduziert den Einflussbereich des Kissenrandes (s. Abbildung 3.3b).

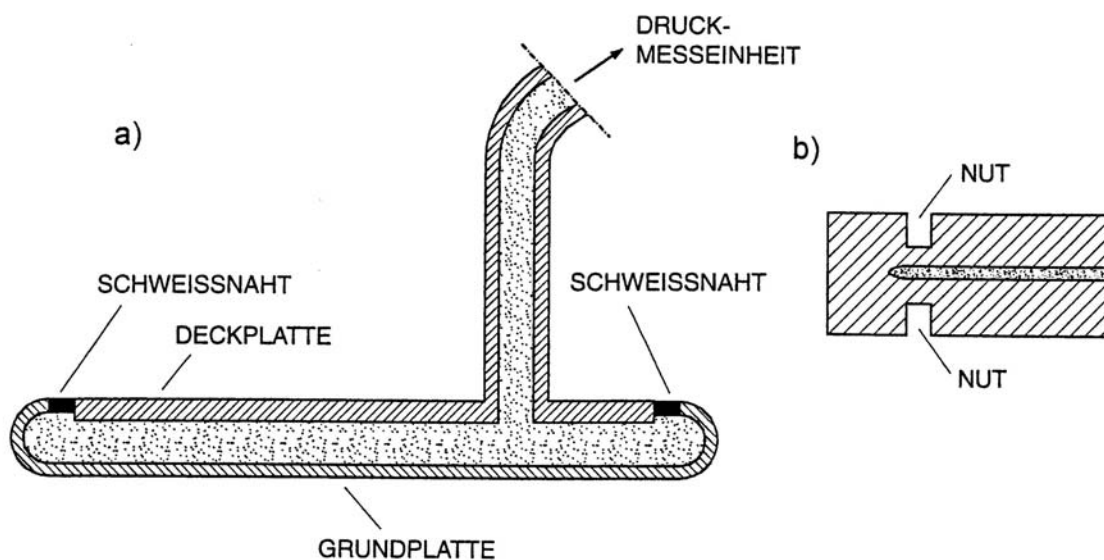


Abbildung 3.3: Beispiele von Druckkissen (a) ohne Randschweißnaht und (b) mit einer Randnut [PAUL und WALTER 2004]

Die Spannungsverteilung auf die Druckmessdosen wurde auch bei MONFORE (1950), PEATTIE und SPARROW (1954), DUNNICLIFF (1993) und KIRBY (1998) ermittelt.

- **Kalibrierung**

Die Druckmessdosen sind Instrumente, die nur relative Messwerte erfassen und die Laborkalibrierung im Wasser ist nur eine Methode zur Prüfung der Konstruktion und Funktion der Instrumente.

Wasser ist ein homogen isotropes Medium, Boden ist inhomogen und anisotrop, deswegen kann der von den Wasserkalibrierungsversuchen abgeleitete Skalierfaktor nicht zum Erfassen des Spannungswertes im Boden verwendet werden.

Infolgedessen ist es zwingend, dass der Benutzer eine Kalibrierung mittels Realmaterials, welches in die Messdose eingebaut wird, durchführt [BRUZZI et al., 1999].

Es ist sehr schwer und teuer, eine genaue repräsentative Kalibrierung im Labor auszuführen, um oder den Kalibrierungsfaktor der Druckmessdose zu bestimmen. Deswegen ist es üblicherweise unmöglich, die Totalspannungen mit großer Genauigkeit zu messen.

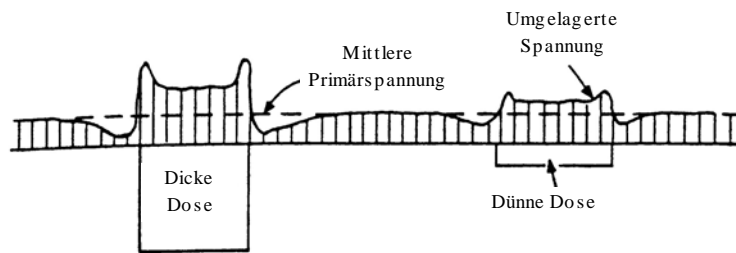
- **Längenverhältnis der Druckmessdose (Verhältnis der Dicke zu Durchmesser)**

Eine genaue Anpassung der Steifigkeiten von Kissen und umgebenden Medium ist jedoch sehr aufwändig. Sie ist zudem nicht immer sinnvoll, da auch das umgebende Medium sich während einer Messung in seiner Steifigkeit ändern kann (z.B. aushärtender Beton).

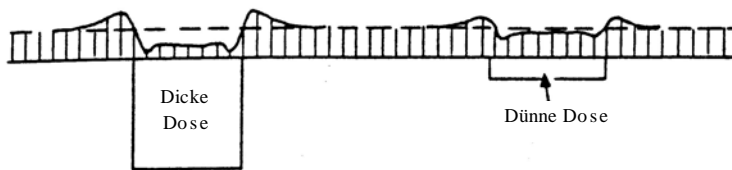
Deshalb ist es zweckmäßig, das Druckkissen konstruktiv so auszugestalten, dass es unempfindlich auf Steifigkeitskontraste reagiert. Hierzu zählt insbesondere ein möglichst geringes Höhen-/Breitenverhältnis des Kissens.

Bei Messung von Bodenspannungen treten Probleme auf, da durch den Einbau des Sensors in dem Boden generell die Spannungen im Boden verändert werden [HANNA, 1985, WEILER und KULHAWY, 1978]. Bei einem großen Verhältnis von Durchmesser zu Dicke werden die Fehler, die durch relative Boden-Dose Steifigkeit das Durchbiegen des Diaphragmas und der Wölbung auftreten, minimiert [NEGUSSEY und STUEDLEIN, 2003].

Die Beeinflussungen von Formfaktor (Verhältnis von Dosedicke zu Dosedurchmesser) und Boden/Messdose Steifigkeitsverhältnis (Verhältnis von Bodensteifigkeit zu Messdosesteifigkeit) sind in Abbildung 3.4 dargestellt.



Dose steifer als Boden (Überschätzung)



Dose weicher als Boden (Unterschätzung)

Abbildung 3.4: Beeinflussung von Formfaktor und Boden/Dose Steifigkeitsverhältnis der eingebetteten Erddruckmessdose [SELIG, 1964]

Um den Einfluss der Spannungskonzentration und der Gewölbewirkung auf die Druckkissen ausreichend zu verringern, sollte das Verhältnis von Breite (bzw. Durchmesser) zu Höhe den Wert von 25:1 [PAUL und WALTER 2004] nicht unterschreiten, nach DUNNICLIFF (1993) größer als 10:1 und nach TAYLOR (1945) größer als 5:1 sein. Je größer dieses Verhältnis wird, desto geringer werden die beschriebenen Störeffekte.

Die Ergebnisse von durchgeführten Ermittlungen bei HEUSERMANN und EICKEMEIER (2004) zeigen, dass bei weichem und bei hartem Einschluss die Differenz zwischen tatsächlich auftretender Gebirgsspannungsänderung und der mit dem Geber gemessenen Spannung mit zunehmender Geberbreite abnimmt.

- **Größe der Messdose**

Der typische Durchmesser von Druckmessdosen für Feldverwendung ist 230-300 mm. Messergebnisse von Druckmessdosen zeigen, dass die Ergebnisse relativ unabhängig von der Größe der Druckmessdose sind [DUNNICLIFF, 1993].

In bindigen Lockergesteinen und in feinkörnigen Sanden haben sich Spannungsgebern mit 120 bis 250 mm Durchmesser bewährt. Zur Messung von Spannungsänderungen in Spritzbetonschalen werden üblicherweise Kissen mit Breiten von 100 bis 150 mm und Längen von 200 bis 250 mm verwendet [PAUL und WALTER 2004].

Bei den in Abbildung 3.5 dargestellten Messergebnissen ist eine Abweichung von ca. 25% vom Mittelwert erkennbar, sowie der generelle Trend, dass die gemessenen Werte zu klein sind, bzw. kleiner werden, je größer die Druckdose ist. Zu kleine Druckdosen mit 50-75 mm

werden durch Maßstabeffekte und Einbauungenauigkeiten (Gewährleistung der Lage bei fortschreitendem Bauablauf) beeinträchtigt, während große Druckdosen (bis 1,2 m Durchmesser) mit hohen Kosten und schwierigen Einbaubedingungen (gleichmäßige Bettung) verbunden sind [DUNNICLIFF, 1993].

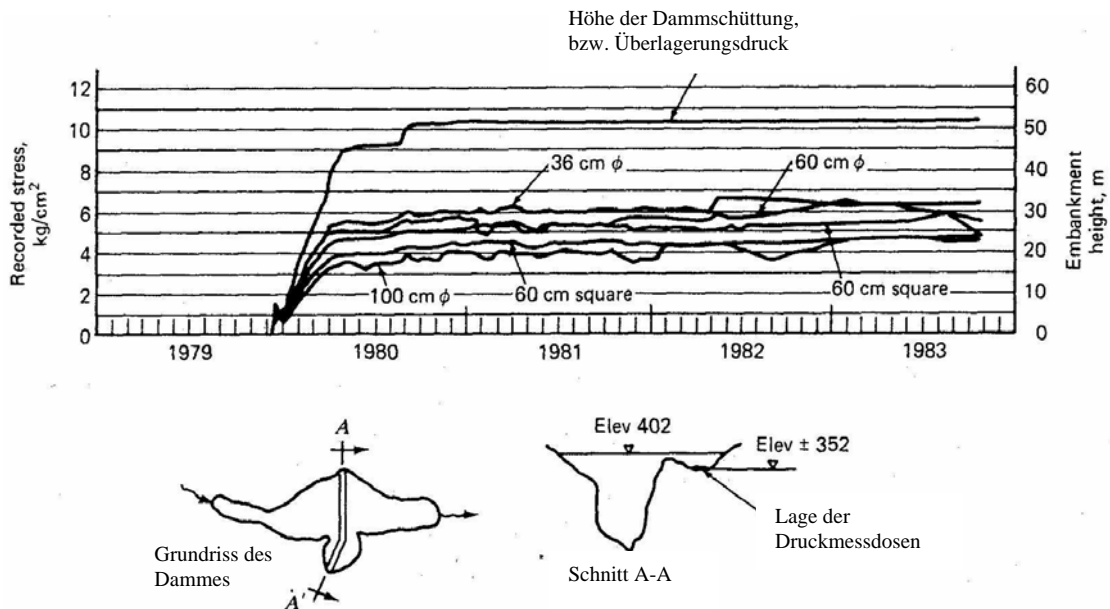


Abbildung 3.5: Differierende Messergebnisse von Druckmessdosen [ALBERRO, BORBÓN, 1985]

Die Größe der Druckkissen wird jedoch andererseits durch die Abmessungen der Prüfkörper (z. B. Dicke der Spritzbetonschale) und die Handhabung beim Einbau (z. B. Einbau von Kontaktspannungsgebern über Kopf) begrenzt. Auch die Heterogenität des Prüfmediums (z. B. Größe und Form von Kluftkörpern, Öffnungsweite von Klüfter und Fugen) kann die Kissengröße bestimmen [PAUL und WALTER 2004].

3.2.2 Ummantelungsparameter

KIRBY (1998) hat gezeigt, dass die Verwendung einer sehr dünnen (1-2 mm) Ummantelung, die geschätzten Spannungen bei den Druckmessdosen ändert. Wenn die Ummantelungszone um die Messdose weicher als der umgebender Boden ist, unterschätzen die Messdosen die Spannungen. Ohne Ummantelung oder wenn die Ummantelungszone steifer als der umgebende Boden ist, überschätzen die Druckmessdosen die Spannungen [HARRIS und BAKKER, 1994]. In feuchten, weichen Böden können die Spannungen nahezu hydrostatisch werden und eine korrekte Messung der aufgetragenen Spannungen ist möglich.

NICHOLS et al. (1987) stellten fest, dass die Spannungen nicht richtig identifiziert werden können, wenn sich der umgebende Boden um die Messdose von der Bodenmasse unterscheidet,

Die feinkörnigen Bodenmaterialien werden als Ummantelung beim Einbau der Druckmessdosen zur Vermeidung unmittelbaren Kontaktes zwischen Messdosen und Bodenmaße (z.B. Schotter) verwendet, um die aufgebrachte Spannungen besser und einheitlich auf die Fläche der Messdose zu überträgt [YANG et al., 2001].

Theoretische und experimentelle Untersuchungen haben versucht, das Verhalten von Druckmessdosen zu begreifen. Die erste wichtige Untersuchung der Registrierungs-faktors wurde von TAYLOR (1947) und MONFORE (1950) ausgeführt. Sie haben gezeigt, dass die gemessene Spannung bei der Druckmessdose, P_e , aufgrund der relativen Steifigkeit der Druckmessdose nach folgender Gleichung berechnet werden kann [TAYLOR, 1947 und MONFORE, 1950]:

$$\frac{P_e}{P} = \frac{B/D \left[\frac{N}{E_s} - \frac{N}{E_c} \right]}{1 + \frac{B}{D} \cdot \frac{N}{E_c}} \quad 3.1$$

P ist die Primärspannung auf der fiktiven Fläche der Messdose, wenn Druckmessdose nicht eingebaut ist. E_s ist der Elastizitätsmodul des Bodens, E_c ist der Elastizitätsmodul der Druckmessdose, D ist der Durchmesser der Messdose, B die halbe Dicke von Messdose und N eine Eigenschaft des Bodens, die eine Funktion von Verformungskenngröße des Bodens ist.

Der mittlere Druck über eine vorgegebene Fläche soll in einer festgelegten Richtung bestimmt werden.

Von einem Messgerät kann diese Aufgabe nicht ohne einen bewussten Eingriff in den natürlichen Vorgang der Kraftübertragung von Korn zu Korn durchgeführt werden. Das bedingt Druckmessgeräte, die sich in den folgenden Eigenschaften von denen der Erdstoffe unterscheiden: In der Gestalt, der Oberflächenbeschaffenheit und Vorformungsverhalten.

Vielfach versuchte man im Rahmen der technischen Möglichkeiten, die elastischen Verformungen der Druckaufnehmer denen der Erdstoffe anzupassen.

KELLER (1967) hat bei der Einbettung ein linearelastischer kreiszylindrischer Körper in einem homogenen, isotropen, elastischen Vollraum gezeigt, dass die ursprüngliche Druckspannung (σ_B) nicht mehr über die Fläche konstant ist, sondern die in Abbildung 3.6 angegebene Form annimmt.

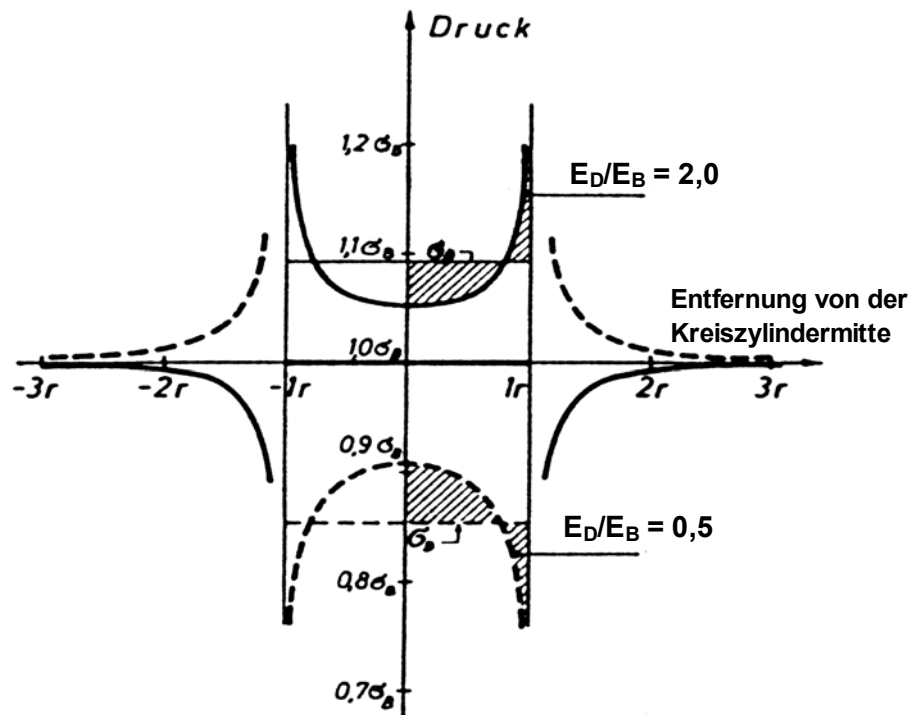


Abbildung 3.6: Änderung eines konstanten Drucks im Vollraum durch einen eingelagerten Kreiszyylinder in der Mittelebene des Kreiszyinders $r/h = 2,5$; [MONFORE 1950]

Die dort gekennzeichnete mittlere Druckspannung σ_D über den Kreisflächen des Zylinders folgt nach [TAYLOR 1947, VON SOOS 1956, PRANGE 1965] der Gleichung [KELLER, 1967]:

$$\sigma_D = \sigma_B \left[1 + \frac{\frac{E_D}{E_B} - 1}{k \cdot \frac{R}{H} \frac{E_D}{E_B} + 1} \right] \quad 3.2$$

mit: R = Radius des Kreiszyinders

H = Höhe des Kreiszyinders

E_D = Elastizitätsmodul des Materials des Kreiszyinders

E_B = Elastizitätsmodul des Materials des Vollraumes

σ_D = die über die Kreisfläche gemittelte Normalspannung

σ_B = konstante Druckspannung in der zur Zylinderachse senkrechten Ebene außerhalb des Einflussbereiches des Zylinders

k = konstanter Faktor, abhängig von der Querkontraktionszahl des Materials des Vollraumes und der Form der Kreisflächendeformation ($k \approx 3$)

Für kreiszylindrische Erddruckaufnehmer gibt Gleichung (3.2) einen Überblick über die Beziehung zwischen der von dem Messgerät aufgenommenen Spannung σ_D und derjenigen, die ohne das eingebettete Messgerät vorhanden wäre (σ_B). Bei Druckspannungszuständen in Erdstoffen, die zur Zylinderachse symmetrisch sind, ergibt Gleichung (nach [PEATTIE und SPARROW 1954, NEUBER 1955] experimentell belegt) qualitativ befriedigende Ergebnisse.

Die Beziehung zwischen dem Spannungsverhältnis σ_D/σ_B in Abhängigkeit von h/r ist in Abbildung 3.7 mit dem Parameter E_D/E_B dargestellt, in Abbildung 3.8 ist E_D/E_B auf der Abszisse aufgetragen und h/r als Parameter gewählt. Nach Abbildung 3.7 empfiehlt es sich, Erddruckaufnehmer mit einem Möglichst kleinen Verhältnis von Höhe zu Radius zu wählen, weil da die vom Messgerät aufgenommene Spannung (σ_D) von der zu messenden (σ_B) nur wenig abweicht. Aus Abbildung 3.8 wird deutlich, dass eine Änderung des Elastizitätsmodulverhältnisses E_D/E_B (im Bereich A) einen geringeren Einfluss auf das Spannungsverhältnis hat als bei kleinen Werten (Bereich B).

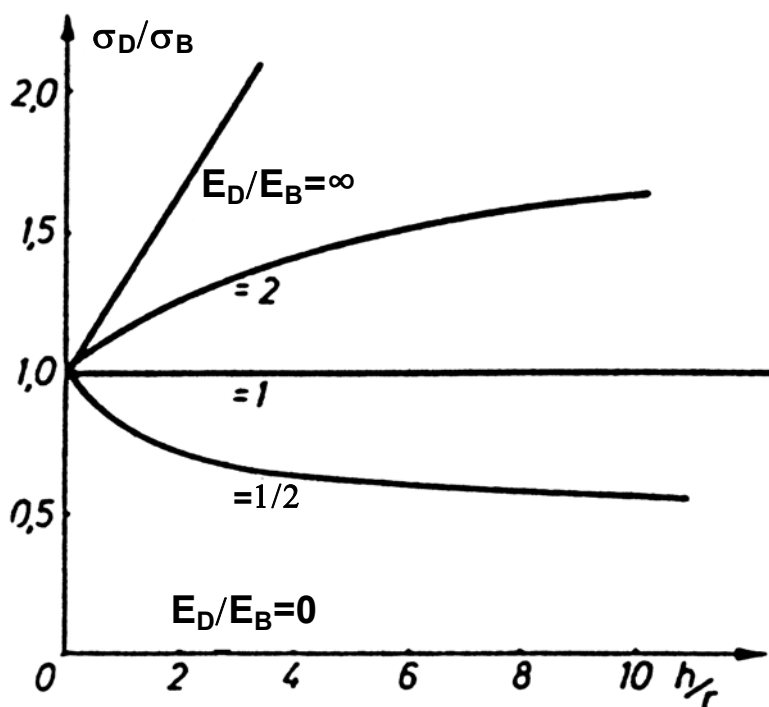


Abbildung 3.7: Verhältnis der aufgenommenen Drücke zu den zu messenden in Abhängigkeit von den Abmessungen des kreiszylindrischen Druckaufnehmers [KELLER 1967]

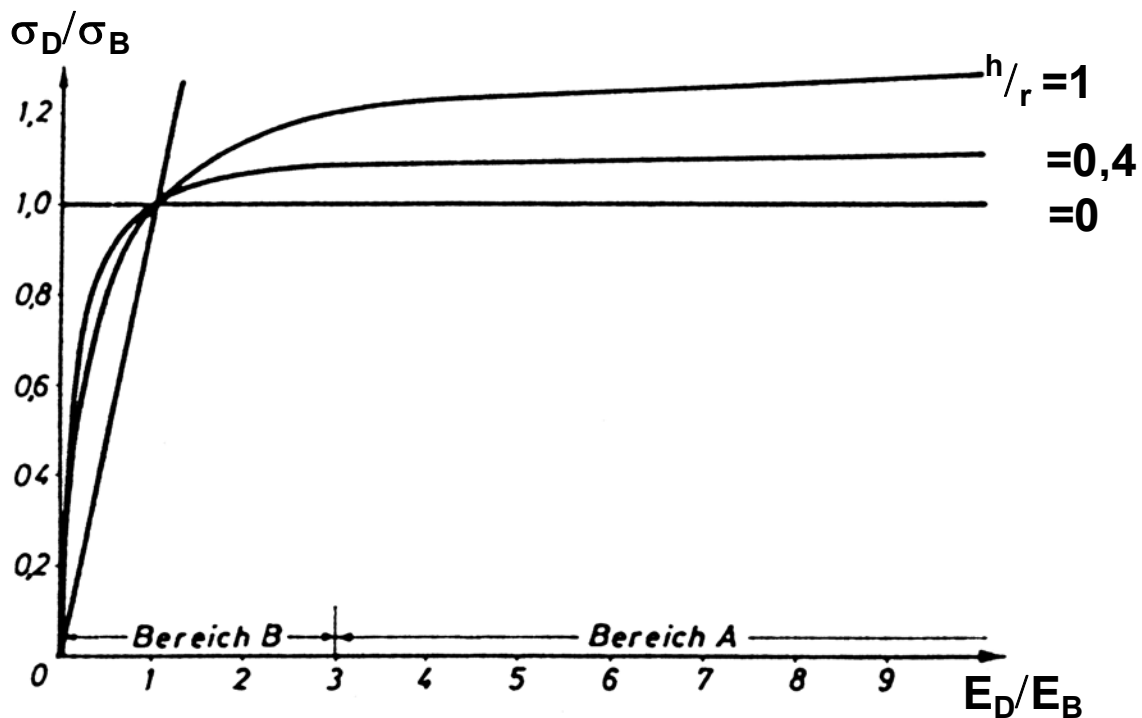


Abbildung 3.8: Verhältnis der aufgenommenen Drücke zu den zu messenden in Abhängigkeit von den Elastizitätsmoduln des Druckaufnehmers und des Erdstoffes [KELLER 1967]

Für die eingangs erwähnten Druckaufnehmer, deren Elastizitätsmoduli denen der Erdstoffe angepasst sind, liegt der Wert E_D/E_B im Bereich B von Abbildung 3.8. Die Druckaufnahme dieser Geräte reagiert hier also besonders empfindlich auf Veränderungen des Elastizitätsmoduls des sie umgebenden Erdstoffes.

PEATIE und SPARROW (1954) empfahlen daher Erddruckaufnehmer mit einem Verhältnis von $E_D/E_B \geq 10$, bei denen die aufgenommenen Drücke (σ_D) zwar stark von den zu messenden (σ_B) abweichen, aber nahezu unabhängig von dem Elastizitätsmodul des Erdstoffes (E_B) bleiben.

3.2.3 Temperaturbeeinflussung

Die Temperaturbeeinflussung auf die Messergebnisse der Druckmessdosen wurden theoretisch und praktisch (im Labor und Feld) mehrfach untersucht [SELLERS (2000), DUNNICLIFF (1997), YANG et al. (2001), FÉLIO und BAUER (1986), DUNNICLIFF (1993), DAIGLE und ZHAO (2003)].

Die Ergebnisse aller Forscher zeigen, dass die Informationen auf Temperaturkorrekturfaktor, die auf den Herstellerdatenblättern gegeben sind, unvollständig und etwas irreführend sind. Die Bedingungen, in denen Messdosen verwendet werden, wurden nicht betrachtet. Wie bei SELLERS (2000) empfohlen wurde, können die Temperaturkorrekturfaktoren für Druckmessdosen viel höher sein, als jene vom Hersteller angegebenen. Nach DUNNICLIFF

(1993) ist es unwahrscheinlich, bei der Temperaturkalibrierung unter unbelasteten Bedingungen die gleichen Ergebnisse zu Erhalten wie bei belasteten Messdosen, welche einen sehr viel größeren Temperatureffekt aufweisen. Er hat auch die Verwendung einer Messdose mit einer Flüssigkeitsschicht zur Minimierung des Temperatureffektes auf die Druckmessdose empfohlen. Es wurde auch darauf hingewiesen, dass die Temperaturbeeinflussung bei Kontaktdruckmessdosen potenziell größer ist, aufgrund der größeren möglichen Temperaturschwankungen der Struktur, auf dem die Druckmessdose gebettet ist. DUNNICLIFF (1997) hat jedoch erwähnt, dass im Gegensatz zu Kontaktdruckmessdosen, eingebetete Installierungen selten von Temperaturänderungen beeinflusst sind.

DAIGLE, ZHAO (2003) haben festgelegt, dass die Temperaturänderungen eine unterschiedliche Beeinflussung auf die schwingende Saite Geber und auf die Öl-gefüllte Spannungskissen haben. Ihre Laborversuche haben gezeigt, dass die Temperaturkalibrierung von der aufgetragenen Spannung abhängt. Die Druckmessdosen, die einen starken Temperatureffekt bei unbelasteten Bedingungen aufweisen, zeigen wahrscheinlich ebenfalls einen starken Temperatureffekt unter Belastung, besonders wenn die aufgetragene Spannung ansteigt. Messdosen mit kleinem Messbereich sind empfindlicher als Messdosen mit einem größeren Messbereich. Sie empfehlen für feuchte Böden, Temperaturen über 0°C sicher zustellen um Frost zu vermeiden.

3.2.4 Auflagerungsbedingungen und Einbaumethode

Bisheriger Stand der Einbettung von Sohldruckgebern ist die Auflagerung auf den lokal vorliegenden Boden, d.h. die Druckmessdosen werden auf das Planum aufgelegt und bei nicht bindigem Material gering mit Boden überschüttet oder z.T. direkt einbetoniert, s. Abbildung 3.9.

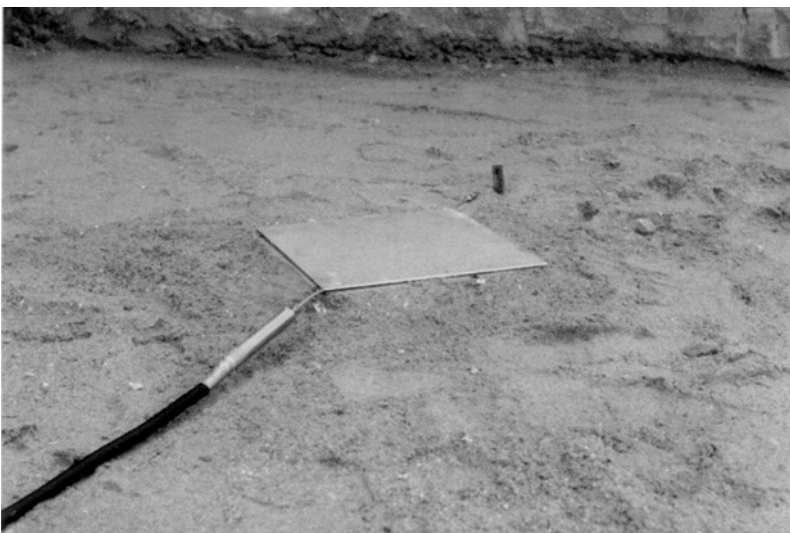


Abbildung 3.9: Installation einer Druckmessdose auf dem Planum

Das unter der Druckmessdose liegende Material wird leicht mit der Hand verdichtet. Einzige Randbedingung hierfür ist, dass der Boden nicht zu grobkörnig sein soll, Grenzen der Korngröße werden jedoch nicht genannt.

Bei verschiedenen Bauvorhaben sind auch andere Auflagerungsvarianten ausgeführt worden, die jedoch in erster Linie aus Erfahrungswerten gesammelt wurden und keinen theoretischen Hintergrund haben. Ein Beispiel für einen solchen Aufbau ist in Abbildung 3.10 zu sehen.

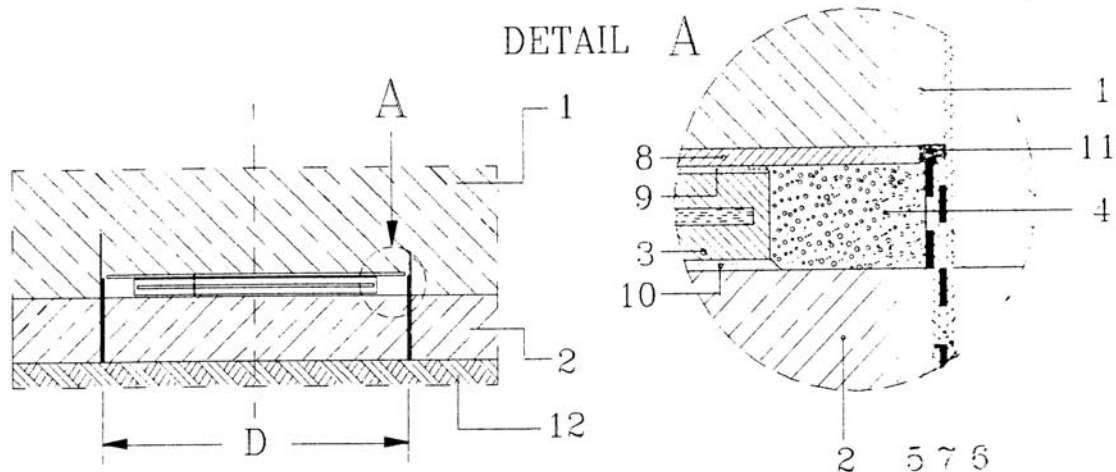


Abbildung 3.10: Installation eines Erddruckgebers unter dem Fundament [SCHWAB et al., 1991]

- (1) Beton; (2) Betonausgleichung, (3) Druckmessdose;
- (4), (11) Zusammendrückende Spaltdichtungsfüllung; (5) Blech innerer Ring;
- (6) Blech äußerer Ring; (7) Fettschmierung; (8) Abdeckplatte;
- (9), (10) gegossenes Harz; (12) Baugrund

HADALA (1967) berichtet von einem deutlichen Effekt der verwendeten Einbaumethode bei Experimentalversuchen. In einigen Fällen hat sich das Überschätzungsverhältnis, durch die veränderte Einbaumethode, um 40 Prozent geändert.

WILSON (1984) erläutert, dass Erddruckmessdosen, die in eine horizontale Ebene in verdichteten Aufschüttungen für Dämme installiert werden, üblicherweise nur 50-70% der berechneten Erhöhung der Vertikalspannung messen.

Es wurde von DUNNICLIFF (1993) aufgezeigt, dass zwei generelle Beobachtungen aus einer Übersicht von Feldeinbaueffekten gemacht werden. Die erste bezieht sich auf die Methode der Installierung und die zweite auf die Auswahl der Art der Druckmessdose.

Obwohl die konventionelle Installationsmethode normalerweise Schäden an den Dosen vermeidet, sind ihre Grenzen klar, und weitere Forschung über das Verhalten von gebetteten Druckmessdosen ist notwendig, um eine verbesserte Methode zur Installierung in verdichteten Schüttungen einzuführen.

Der nächste generelle Überblick bezieht sich auf den Effekt uneinheitlicher Auflagerung und Kräfte zu einer Empfehlung für die Auswahl der Art der Druckmessdose. Diaphragma Messdosen sind für eine einheitlich verteilte Kraft auf die Aktivfläche bestimmt und kalibriert, und Lastpunkte, uneinheitliche Spannungen oder Wölbungen führen zu signifikanten Abweichungen. Hydraulische Druckmessdosen neigen auch zu Fehlern aufgrund dieser Ursachen aber in geringerem Umfang als Diaphragma Messdosen. Die beste Auswahl scheint eine ebene Hydraulikmessdose mit dicker Aktivfläche, möglichst mit Fugen zur Erhöhung der Flexibilität, und einer dünnen Schicht von Flüssigkeit zu sein[DUNNICLIFF, 1993].

von BRUZZI et al. (1999) werden folgende Maßnahmen für die Installierung von Druckmessdosen empfohlen:

- Die Fläche, auf die die Druckmessdose eingebaut wird, soll möglichst flach sein.
- Das empfindliche Element muss völlig orthogonal zur aufgebrachten Spannung angepasst werden, um eine falsche Übertragung der Drücke zu vermeiden.
- Der umgebende Bereich des Randes der Messdose soll isoliert sein, um eine vollständige Übertragung der aufgebrachten Spannung auf das sensitive Element zu ermöglichen.
- Randeffekte sollten durch Installierung der Druckmessdosen in einen feinkörnigen Bodens (Tasche) vermindert werden.
- Die Messdosenfläche musste mit verdichtetem gleichartigem Boden ummantelt werden.

Beim Einbau der Messdosen in einen Tasche unter der Strukturfläche soll die Dimension der Tasche mindesten dreimal größer sein als der Durchmesser der Messdose, um Randeffekte zu minimieren.

Die Lageneignung der Druckmessdose hat auch eine zusätzliche Beeinflussung auf die Messergebnisse, d.h. wenn die Messdosen nicht horizontal eingebaut werden oder durch Aufschüttung die Orientierung der Messdosen geändert wird, verändern sich auch die Messergebnisse [DIBIAGIO, 1977].

REIFF und LINGER (1967) haben Richtlinien für die Beeinflussung von Nachbarschaft von Strukturen und andere Druckmessdosen in Ausführung der Spannungsmessungen bei Druckmessdose zu Verfügung gestellt. Für Vertikalspannungsmessung bei Messdosen empfehlen sie:

- Minimaler Horizontalabstand zwischen Druckmessdosen: 1,5 x Durchmesser
- Minimaler Vertikalabstand zwischen Messdosen: 4 x Durchmesser Druckmessdose.
- Minimaler Horizontalabstand zur Wand: $\frac{1}{2}$ Durchmesser Druckmessdose

HANNA (1985) schlägt einen Abstand von mindestens einem Meter zwischen einzelnen Messdosen vor.

3.2.5 Bodeneigenschaften

Nach DUNNICLIFF (1993) sind erfolgreiche Spannungsmessungen in Tonböden ausgeführt worden.

Sehr große Bodenkörner im Vergleich zum Durchmesser des verwendeten Messgebers führen zu uneinheitlicher Auflagerung und als Folge davon zu einer uneinheitlichen Belastung auf die Messdose.

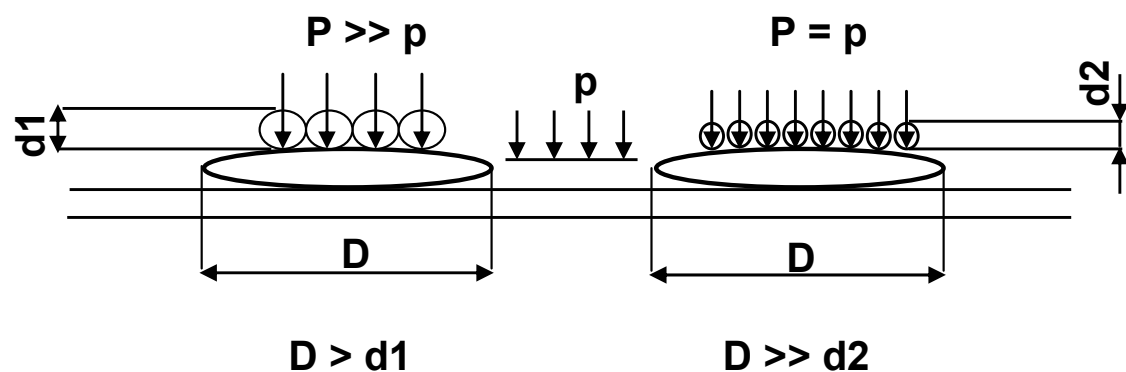


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung von Beeinflussung der Bodenkorngröße [BRUZZI et al. 1999]

WEILER und KULHAWY (1982) haben empfohlen, dass zur Vermeidung von "Punktlast" Effekten die Bodenkorngröße bezüglich Durchmesser von Druckmessdose ausreichend klein sein müssen. Mit anderen Worten, die Messdose soll eher ein Kontinuum als eine Serie von Diskretkräften empfinden.

Nach YANG et al. (1999) sollte Mittelsand zum Ummanteln der Messdose und Gebergehäuse verwendet werden, um die Messdose von möglicher Punktlast zu schützen.

Das Maximum der Bodenkorngröße soll kleiner als Dosendurchmesser durch 50 sein. Das Verhältnis von Bodenkorngröße und der Druckmessdose in eine Aufschüttung ist in Abbildung 3.12 dargestellt.

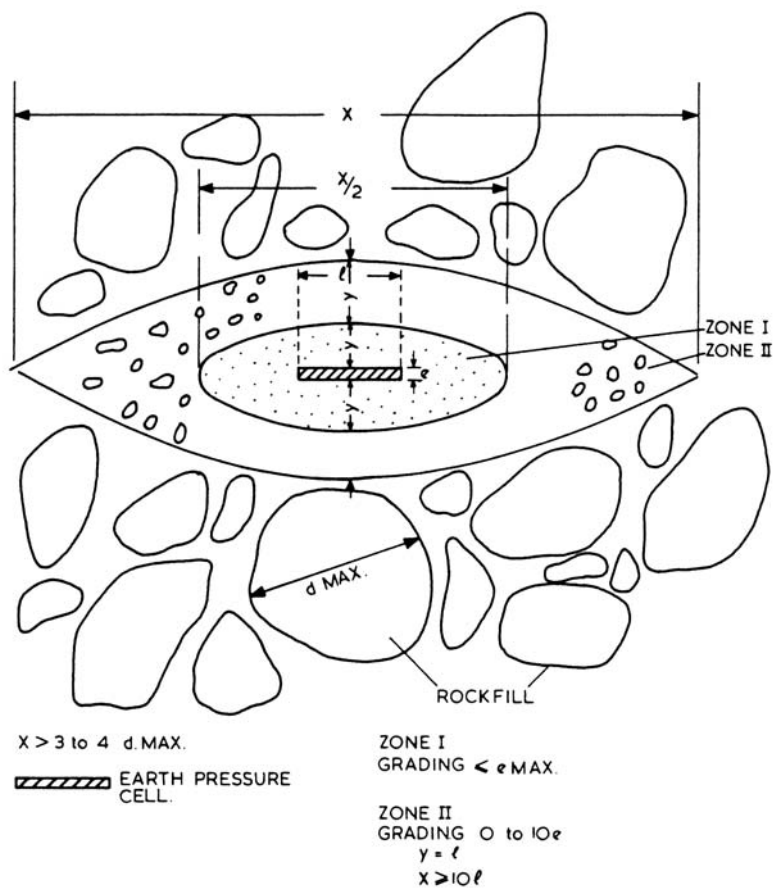


Abbildung 3.12: Darstellungsmethode zum Einbau der Druckmessdose in Aufschüttungen [HANNA 1985]

3.3 Einflussfaktoren auf die Ergebnisse der Messelemente im Beton

3.3.1 Eigenschaften des Betons

3.3.1.1 Betonabbindeprozess

Als Folge der Hydratation erwärmt sich der Beton. Die Erwärmung ist mit einer Volumenzunahme verbunden, die bei Behinderung zu Betondruckspannungen führt. Bereits während der ersten Stunden nach Wasserzugabe treten im Beton Volumenreduzierungen und damit Druckspannungen auf. Eine definitive Aussage zur Entwicklung der nutzbaren mechanischen Eigenschaften des Betons (Festigkeit, Elastizitätsmodul) während des Abbindeprozesses ist jedoch nicht möglich.

Die mechanischen Eigenschaften des jungen Betons sind zwar noch nicht technisch nutzbar, die entstehende Wärmeentwicklung und Volumenänderung ist aber für die späteren mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit des Betons von wesentlicher Bedeutung. Eine quantitative Erfassung der Eigenschaften sollte daher wesentlicher Bestandteil der modernen Betontechnologie sein.

Der zeitliche Verlauf der Kurven ist in fünf Stadien unterteilt:

Stadium I 0 bis ca. 2 Stunden

Anfangsstadium ohne Temperaturerhöhung (Ruhezeit)

Stadium II ca. 2 bis 5 Stunden

Temperaturanstieg durch Hydratation; keine messbaren Spannungen, Wärmedehnung des noch verformbaren Betons in Form von Stauchung; Temperatur am Ende des Stadiums ist T_{01}

Stadium III ca. 6 bis 9 Stunden

Weitere Erwärmung des Betons; zunehmende Betonfestigkeit; Aufbau von Druckspannungen, zum Teil durch Relaxation abgebaut. Stadium endet mit höchster Temperatur T_{\max}

Stadium IV ca. 9 bis 11 Stunden

Temperatur nimmt ab; ein Teil der Druckspannung wird durch Relaxation abgebaut. T_{02} wird erreicht, liegt durch Abkühlung und Schwinden über T_{01} .

Stadium V ca. 11 bis 15 Stunden

Weitere Abkühlung, zunehmende Zugspannungen, die z.T. durch Relaxation reduziert werden. Bei Überschreitung der Zugfestigkeit des Betons (ΔT_{krit}) entstehen Trennrisse.

Den Zusammenhang von Temperatur- und Spannungsänderungen stellt Abbildung 3.13 dar.

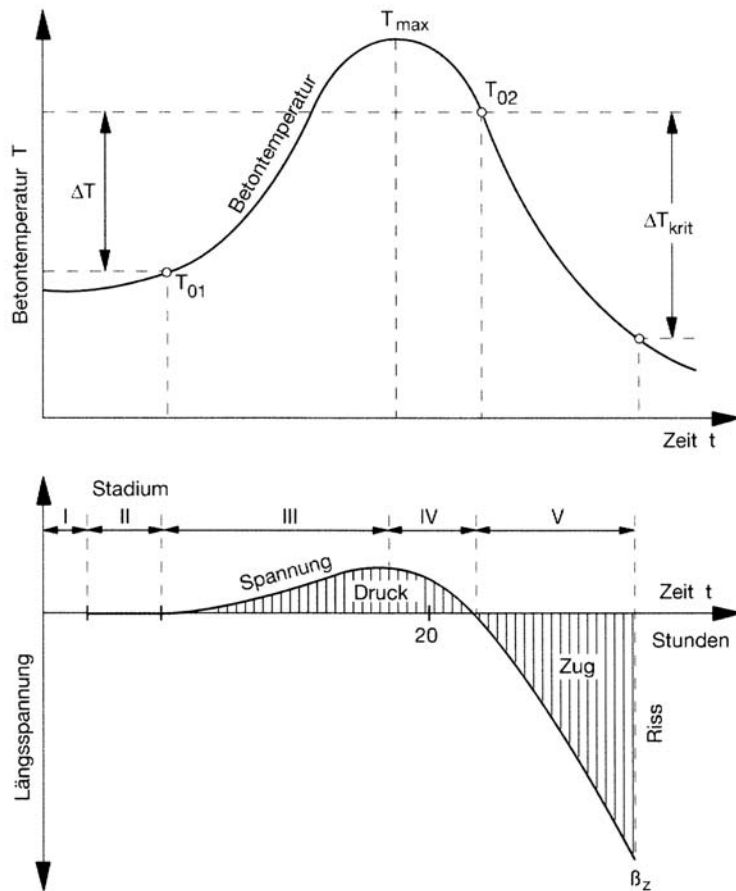


Abbildung 3.13: Temperatur und Spannungsverlauf während des Abbindprozesses [WEIGLER und KARL, 1974]

Die Lage von T_{02} ist von mehreren Faktoren, z.B. der Wärmefreisetzungsgeschwindigkeit, der Bauteildicke und den Abkühlungsbedingungen sowie der Zementart abhängig. Zwischen der Maximaltemperatur im Beton und den entstehenden Zwangsspannungen besteht eine eindeutige, jedoch schwer zu prognostizierende Tendenz. Selbst eine qualitative Vorhersage ist schwierig, da die Spannungen in Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul, Temperaturanstieg und zeitlicher Entwicklung des Temperaturmaximums und der Relaxation entstehen.

Durch die entstehenden Spannungen im Beton werden ohne äußere Belastung Spannungsänderungen gemessen. Überlagern sich diese mit der äußeren Belastung ergeben sich kaum zu interpretierende Werte. Die Auswirkungen des Abbindeprozesses, insbesondere aber auch die Dauer der Spannungsänderungen, die unter Umständen Jahre dauern können [RÖHLING, 2005], müssen daher ausreichend bekannt sein.

Die zeitliche Entwicklung der Hydratationswärme und der Maximalwert hängen von Ausgangsstoffen, der Temperatur und der Nachbehandlung ab [RUCKER et al., 2003]. Zur Ermittlung des Einflusses auf die Messergebnisse ist vor allem die Dauer der

Spannungsänderung wichtig, um die Möglichkeit der Überlagerung von Abbindeprozess und externen Lasten zu minimieren.

Je schneller die Hydratation und die Entwicklung des Elastizitätsmoduls verlaufen, desto zeitiger tritt das Druckspannungsmaximum auf und umso größer wird die resultierende Zugbeanspruchung. Je länger die Hydratationsphase und je langsamer die Wärmeentwicklung ist, desto größer sind die entstehenden Druckspannungen im Beton. Besonders bei massigen (Staumauern) und verformungsbehinderten Bauteilen (Tunnelinnenschalen) ist die Spannungsentwicklung daher zu beachten [EIERLE, SCHIKORA, 2000].

3.3.1.2 Schwinden

Unter Schwinden versteht man die Volumenreduzierung durch Wasserverlust. Je nach zeitlichem Auftreten unterscheidet man in:

- Plastisches Schwinden (Frühschwinden) durch Wasserverlust des frischen Betons
- Chemisches Schwinden durch Volumenreduzierung während der Hydratation
- Trocknungsschwinden des erhärteten Betons infolge Austrocknung

Das Schwinden teilt sich in die Phasen Frühstadium und Langfristiges Schwinden, die in Abbildung 3.14 dargestellt sind [HOLT, 2001].

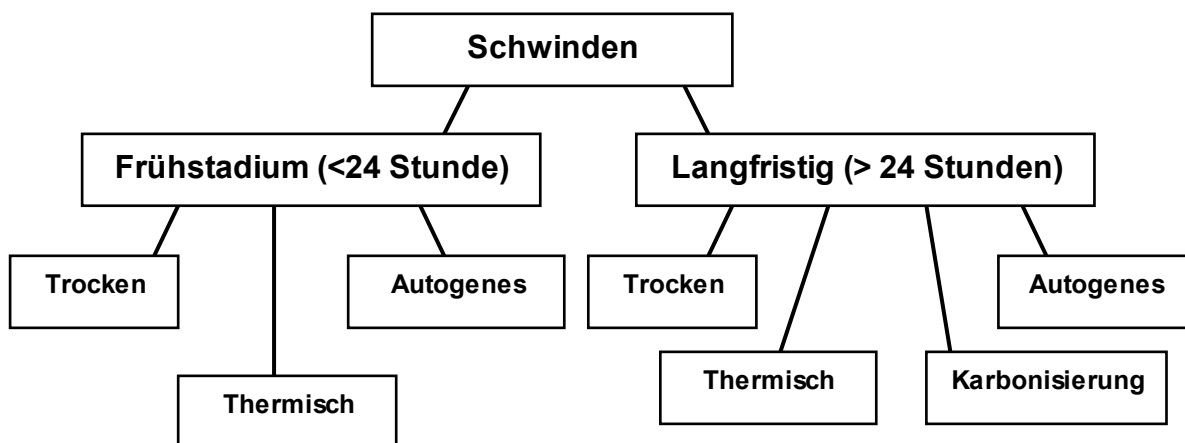


Abbildung 3.14: Unterschiedliche Schwindarten und -stufen [HOLT, 2001]

In jungem Beton führt nur das chemische Schwinden zu nennenswerten Zwangsspannungen. Auswirkungen auf die Messergebnisse geotechnischer Messinstrumente hat vor allem das Trocknungsschwinden, da hier der Beton schon eine ausreichende Festigkeit zur Aufnahme externer Lasten hat. Das Trocknungsschwinden setzt nach dem Aushärten des Betons ein, während der Beton der Witterung ausgesetzt ist. In der Regel wird nur das Trocknungsschwinden in der Berechnung eines Bauteils erfasst [HOLT, 2001].

Das Trocknungsschwinden unterteilt sich in reversibles und irreversibles Schwinden. Der reversible Anteil kann durch Veränderung der Umgebungsbedingungen (Feuchte) rückgängig gemacht werden [MEHTA, MONTEIRO, 1993]. Die Größe des Schwindens ist vom Zuschlagsstoff, dem Wasser/ Zement- Wert (w/z), dem Zement, der relativen Feuchte und den Bauteilabmessungen abhängig [DELARRARD et al., 1994]. Beton mit höherem Zuschlagstoffanteil und einem geringeren Wasser/ Zement- Wert (w/z) weist ein geringeres Trockenschwinden auf [HANSEN, 1987].

Für die Messung der durch die externen Lasten erzeugten Spannungen innerhalb eines Betonkörpers ergibt sich damit die Schwierigkeit, die Spannungsänderungen separat vom Abbindeprozess betrachten zu können. Eine Überlagerung der Spannungen führt zu einer Fehlinterpretation der durch auftretende Zusatzlasten im Beton erzeugten Spannungen. Die vorhandenen Tragfähigkeitsreserven können dadurch nicht ermittelt werden. Die aus Messungen abgeleiteten Spannungsverteilungen können zu falschen zukünftigen Berechnungsannahmen führen.

Die Größe und Form sind zusammen oft als Verhältnisbereich von Volumen-zu-Fläche betrachtet. Die größeren Proben werden für längere Zeit schwinden, aber der Endwert kann kleiner sein [Holt, 2001].

Es gibt keine Korrelation zwischen der Größe von frühzeitigem und langfristigem Schwinden. Das Schwinden durch diese zwei Phasen stellt das "Gesamtschwinden" für einen Beton dar.

Die gängigste Lösung zur Reduzierung frühzeitiger Volumenänderungen ist die Vermeidung der Trocknung mit der richtigen Behandlung des Betons in den ersten Stunden nach der Betonierung.

3.3.2 Experimentelle Bestimmung von Temperaturspannungen

Die ersten Versuche zur Messung der Spannungen im Beton wurden bereits 1930 ausgeführt, wobei vorwiegend Dehnungsmessgeber mit schwingender Saite oder elektrischem Widerstand verwendet wurden. Die Bestimmung der Betonkennwerte ist nur mit erheblichem versuchstechnischen Aufwand möglich. Trotzdem entstehen deutliche Streuungen der Kennwerte. Eine getrennte Ermittlung einzelner Einflussparameter ist nahezu ausgeschlossen. Daher müssen die Spannungen unter Berücksichtigung aller Einflüsse gemessen werden [PLANNERER, 1998].

3.3.2.1 Spannungsmessungen

a) Indirekte Messung

Zwangspannungen können über die aufgetretenen Dehnungen ermittelt werden. Dabei werden die Dehnungen des Betons ϵ_{frei} gemessen, die nicht zu Zwangspannungen führen. Die Zwangsspannungen ergeben sich nach [PLANNERER, 1998].

$$\varepsilon_{\text{beh.}} = \varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{frei}}, \quad \text{wobei} \quad \varepsilon_0 = \alpha_t \cdot \Delta T \quad [-] \quad 3.3$$

mit: α_t = Temperaturdehnzahl [1/K]

ΔT = Temperaturdifferenz [K]

Die behinderte Dehnung setzt sich aus elastischen und inelastischen Dehnungsanteilen zusammen, von denen der elastische Anteil zu Zwangsspannungen (vgl. Abbildung 3.15) führt.

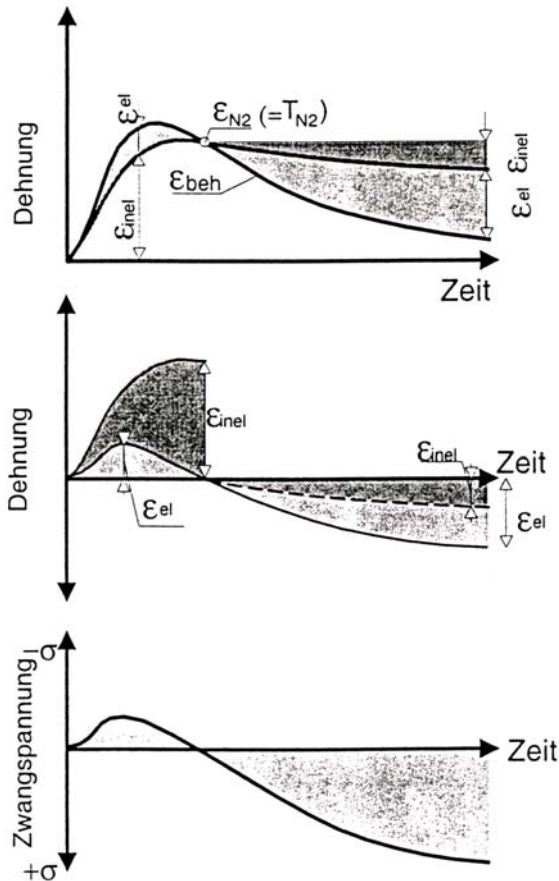


Abbildung 3.15: Dehnungsanteile nach PLANNERER [1998]

Zur Berechnung der Temperaturspannung muss der Elastizitätsmodul z.B. an separaten Probekörpern oder Bohrkehren ermittelt werden. Die Zwangsspannungen ergeben sich nach PLANNERER (1998) zu:

$$\sigma_{zw} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{frei}}) \frac{1}{1 + \phi} \cdot E \quad [\text{N/mm}^2] \quad 3.4$$

mit: ϕ = Kriechzahl [-]

b) Direkte Messungen

Direkte Spannungsmessungen werden z.B. im Rahmen der Bauwerksüberwachung von Staumauern und Tunnelinnenschalen ausgeführt. Hierbei werden hauptsächlich membranartige Druckmessdosen nach Carlson [CARLSON und PRITZ, 1952] eingesetzt, die

für die Messung von Druckspannungen in erhärtetem Beton entwickelt wurden. Mit diesen Messgeräten können im Gebrauchszustand die Spannungen aus äußerer Belastung (z.B. Wasserdruck) erfasst werden. Einen Überblick über direkte Verfahren zur Spannungsmessung ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

Tabelle 3.1: Verfahren zur Messung von Spannung infolge Belastung und Zwang [PLANNERER, 1998]

Spannungsaufnehmer mit Verformungskörper		Pneumatische bzw. hydraulische Kompensation	Zerstörende Prüfverfahren /Überbohrverfahren	Photoelastische Spannungsaufnehmer
Erhärteter Beton in situ	Messmembran [CARLSON, PRITZ, 1952] Baumanträger [Laboratorium der TU München, 1990]	Druckkissen [GLÖTZL, 1998]	Überbohrverfahren Bohrloch-Schlitzsonde [BECKER, WERNER, 1995]	Durchstrahlung, Reflexion mit Glaskörpern [ROBERTS et al., 1965]
Junger Beton Labor in situ	Reißrahmen, Temperaturspannungs-Prüfmaschine Stress-meter [RILEM, 1998]	----- -----	----- -----	----- -----

Zur direkten Messung der Betonspannungen sind folgende Randbedingungen zu beachten:

- Die Zwangsspannungen des Betons dürfen das Messgerät nicht verändern. Dehnsteifigkeit und Temperaturdehnung von Messgerät und Beton müssen nahezu identisch sein.
- Die zum Hervorrufen einer Zwangsspannung notwendigen verhinderten Dehnungen sind sehr klein ($<0,1 \text{ ‰}$). Das Messinstrument muss eine hohe Genauigkeit aufweisen.
- Wenn Druck- und Zugspannungen gemessen werden sollen, muss eine ausreichende Verbindung von Messinstrument und Beton zur Übertragung von Zugkräften bestehen.
- Das Messgerät muss robust sein, um Belastungen des Betoniervorgangs zu widerstehen.

c) Messinstrumente

Zur Betonspannungsmessung werden in der Regel Spannungsgeber mit Nachspannröhrchen verwendet. diese Methode ist bereits in Kapitel 2 vorgestellt worden.

3.3.3 Einfluss der Temperatur auf den Hydratations- und Erhärtungsverlauf

- **Temperaturentwicklung infolge Hydratationswärme**

Die während der Hydratation entstehende Temperatur ruft mehrere Wirkungen hervor. Höhere Temperaturen beschleunigen die Reaktionen zwischen Zement und Wasser und führen dazu, dass die Hydratationswärme schneller freigesetzt wird und die Festigkeitsentwicklung zu einem früheren Zeitpunkt beginnt (kinetischer Aspekt). Durch ansteigende Temperaturen werden reaktionsträge Zusatzstoffe, wie beispielsweise Hüttensand, angeregt, in größerem Umfang Verbindungen mit dem Anmachwasser einzugehen und tragen dann dadurch stärker zur Wärmebilanz im Bauteil bei [RUDOLPH, 2002]. Kennzeichnend ist, dass Portlandzement die höchsten Wärmeraten aufweist, die durch hüttensandhaltige Zemente nicht erreicht werden. Der Einfluss der Temperatur auf die Reaktionskinetik des Zements nimmt mit dem Hüttensandgehalt zu [RÖHLING, 2005].

Die größten Temperaturdifferenzen mit 20-25 K zwischen Tag und Nacht treten im Mai und Oktober auf.

Jede Temperaturänderung äußert sich in einer Formänderung. Wenn diese behindert ist, wird ein Zwangspannungszustand aufgebaut.

Die Umgebungstemperatur beeinflusst das plastische Schwinden. Eine höhere Temperatur fördert die Verdunstung, sie beschleunigt aber gleichzeitig die Hydratation. Das plastische Schwinden setzt etwas früher ein, hört aber auch früher auf [GRÜBL et al., 2001].

- **Temperaturverteilung im Betonkörper**

Die bei der Betonerhärtung durch die Hydratation des Zementes entstehende Wärme fließt nur langsam ab, sodass der Bauteilkern erheblich stärker erwärmt ist als die Schale (innerer Zwang, „Querspannungen“). Die Temperaturunterschiede führen innerhalb des Querschnitts im Kern zu Druck- und in den Randzonen zu Zugspannungen (Abbildung 3.16 und Abbildung 3.17).

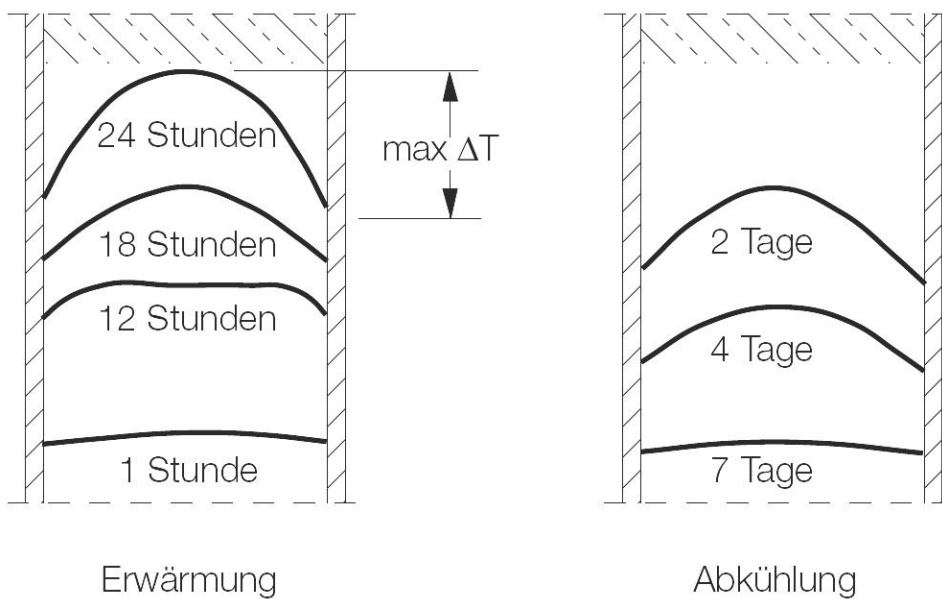


Abbildung 3.16: Temperaturverlauf bei Erwärmung und Abkühlung [BAYER, 2000]



Abbildung 3.17: Temperaturverlauf und Eigenspannungen am Beispiel ΔT [BAYER, 2003]

Der Beton erhärtet vielmehr bei einem zeitlich veränderlichen Temperaturgradienten, wobei sich der Beton wegen des zum Querschnitttrand zunehmenden Wärmeabflusses außen i.d.R. weniger erwärmt als in Querschnittsmitte [PLANNERER, 1998].

Die zentrische Zwangsspannung (Normalspannung) ergibt sich aus der Differenz zwischen den im Querschnitt gemittelten vorhandenen Temperaturen und der Nullspannungstemperatur [PLANNERER, 1998].

- **Beeinflussung der Umgebungstemperatur**

Aushärtung von Beton ist ein chemischer Prozess und wie in vielen chemischen Reaktionen ist die Geschwindigkeit zeitabhängig. Je niedriger die Temperatur, desto langsamer ist der Prozess der Aushärtung oder des Abbindens vom Beton.

Bei einer Umgebungstemperatur wenig über 0°C ist die Entwicklung der Festigkeit in ungeschütztem frisch eingebauten Beton sehr langsam. Falls die Umgebungstemperatur

unter 0°C fällt, gefriert eventuell etwas Wasser im Beton. Das Abbinden wird bis zu einem erneuten Wiederauftauen nahezu beendet. Dieser Abbruch der Hydratation erhöht die Porosität und reduziert die Festigkeit und Dauerhaftigkeit.

Durch die Entstehung von Wärme beim Abbindeprozess hat der Beton einen geringfügigen Widerstand gegen Gefrieren des Wassers direkt nach der Einbetonierung. Wenn jedoch die Temperatur der Betonfläche unter den Gefrierpunkt fällt, erstarrt das Wasser, erhöht das Volumen und bewirkt eine hohe Spannung im Beton, der nicht länger plastisch ist [READYMIX, 2003].

3.3.4 Beeinflussung der Abmessung des Betonkörpers

Die Größe und Form der Betonprobekörper beeinflusst das Maß von Feuchteschwankungen unter einer gewissen Lagerungsbedingung. Dies kann den Grad der Volumenänderung sowie totale Aufweitung oder Schrumpfung beeinflussen.

ALUMDAIHEEM und HANSEN (1987) haben das Schwinden von Proben verschiedener Abmessungen über eine Jahresfrist beobachtet. Das Schwinden nimmt mit Zunahme der Probengrößen ab. Es wurde herausgefunden, dass der Endwert des Schwindens von Mörtel und Beton unabhängig von Größe und Form der Probe entsprechend der dynamische Schwinden/Gewichts-Verlustkurve ist. Sie folgern daraus, dass der Endwert des Trockenschwindens für klein maßstäbliche Probekörper (25 x 25 x 279 mm mit gleichen Mischungseigenschaften wie größere Bauteile) aus einem Diagramm, welches das Schwinden über die Trocknungszeit aufträgt, abgeschätzt werden kann [MOKAREM, WEYERS, 2003].

3.3.5 Beeinflussung der Zementart

Ein Hauptbestandteil des Zementes ist der Portlandzementklinker. Darüber hinaus kann Zement andere Hauptbestandteile wie Hüttensand, natürliche Puzzolane, Flugasche, Ölschieferabbrand oder Kalkstein enthalten. Von diesen Stoffen wird in Deutschland in erster Linie Hüttensand verwendet, dessen Einsatz sich seit langem bewährt hat [SCHNEIDER, MENG, 2000].

Die Verwendung von Hüttensand als Hauptbestandteil von Zement ist nicht nur aus wirtschaftlicher und ökologischer Motivation interessant, sondern sie bietet darüber hinaus betontechnologisch nutzbare Aspekte. Die Hüttensandreaktion ist langsamer („latent“-hydraulisch) als die Reaktion der Klinkerpartikel und auf der anderen Seite ergeben sich gewisse Unterschiede bei den Reaktionsprodukten.

Der Hüttensandgehalt nimmt von den CEM I-Zementen über die CEM II-Zemente zu den CEM III-Zementen sukzessive zu. Daher sind die Portlandhüttenzemente (CEM II-S) hinsichtlich ihrer betontechnologischen Eigenschaften zwischen den Portlandzementen und den Hochofenzementen einzuordnen. Dort wo sich CEM I und CEM III besonders stark

hinsichtlich ihrer Eigenschaften unterscheiden (Abbildung 3.18 z.B. Hydratationswärmeentwicklung, Widerstand gegen verschiedene chemische Angriffsarten, Porenstruktur), nimmt der Portlandhüttenzement eine Mittelposition ein, die bei vielen Betonanwendungen von Vorteil sein kann.

Veränderung der Betoneigenschaften		
Hüttensandanteil zunehmend	↓	langsamere Erhärtung
	↓	geringere Anfangsfestigkeit
	↑	größere Nacherhärtung
	↑	niedrigere Wärmeentwicklung
	↑	dichteres Gefüge
	↑	höherer Widerstand gegen chemischen Angriff
	↓	zunehmende Nachbehandlungsempfindlichkeit

Abbildung 3.18: Einfluss von Hüttensand auf ausgewählte betontechnologische Eigenschaften
[SCHNEIDER, MENG, 2000]

In Abbildung 3.19 ist gut zu erkennen, dass aufgrund der trägeren Hüttensandreaktion die Anfangserhärtung der Zemente mit zunehmendem Hüttensandgehalt langsamer abläuft. Da der Hüttensand jedoch in höherem Hydratationsalter immer noch einen deutlichen Reaktionsfortschritt zeigt, weisen die hüttensandreichen Zemente eine höhere Nacherhärtung im Alter nach 28 Tagen auf. Durch diese systematisch langsamere Reaktion mit zunehmendem Hüttensandgehalt reagieren hüttensandreiche Zemente allerdings empfindlicher auf eine mangelhafte Nachbehandlung, die zum Schutz des Betons gegen Austrocknung, z.B. durch Schalung, Folien, Nachbehandlungsfilme, bei allen Betonen erforderlich ist [SCHNEIDER, MENG, 2000].

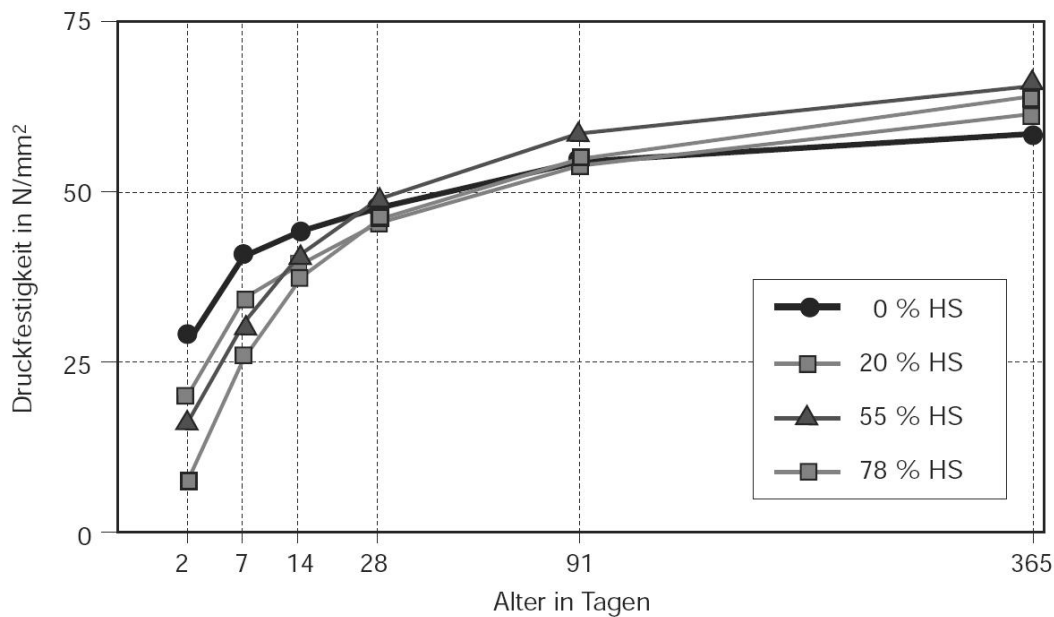


Abbildung 3.19: Festigkeitsentwicklung von Mörteln aus Zementen gleicher Festigkeitsklasse in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt [SCHNEIDER, MENG, 2000]

Die Abhängigkeit der Hydratationswärmeentwicklung vom Hüttensandgehalt ist im Anhang B, Abbildung 1 dargestellt.

3.3.6 Beeinflussung des Wasserzementwertes

Das Wasser-zu-Zement-Verhältnis oder w/z-Wert ist das Gewicht von verbrauchtem Wasser geteilt durch das Gewicht von verbrauchtem Zement infolge der Betonherstellung. Dieses Verhältnis wird in einem Dezimalbruch angegeben. Nach dem Abbindeprozess ist dies der zweitwichtigste Faktor für die Qualität des Endproduktes.

Für einen konstanten w/z-Wert reduziert ein inkrementeller Anstieg des Zementgehaltes das Kriechen und reduziert das Trockenschwinden. Das ist der einzige Fall, in dem ein gegenläufiger Effekt existiert [NEMATİ, 2003].

Es wurde bei JUSTNES et al (2000) gezeigt, dass die Abbindezeit des Betons mit einer Zunahme des w/z-Wertes zunimmt. Die Abbindezeit ist auch von den Umgebungsbedingungen und besonders von der Temperatur stark abhängig.

Der Wasserzementwert wirkt sich zu Beginn des Hydratationsprozesses zunächst nicht merklich aus. Nach 24 Stunden weist der Hydratationsablauf und die Wärmefreisetzung immer größere Unterschiede auf. Eine Steigerung des w/z-Wertes führt zu einer Zunahme der Hydratationsgeschwindigkeit und einem höheren Hydratationsgrad bzw. einer größeren insgesamt entwickelten Wärmemenge. Dies trifft auf Massenbetone mit einem vergrößerten Gehalt an Zugabewasser zu [RÖHLING, 2005].

4 Untersuchung der Auflagerungsbedingungen

4.1 Versuchsprogramm

Zur Erforschung unterschiedlicher Einflussfaktoren werden die Druckmessdosengrößen, die Messaufnehmer, der umgebende Boden, die Tiefenlage der Druckmessdose sowie die Größe und Steifigkeit der Belastungsplatte variiert. Deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Ergebnissen werden herausgearbeitet. Für die Versuche wurden Druckmessdosen unterschiedlicher Abmessungen und Druckaufnehmern von zwei Herstellern verwendet (Tabelle 4.1)

Tabelle 4.1: verwendete Druckmessdosen

Anzahl Druckmessdosen	Hersteller	Form	Abmessung	Druckaufnehmer	Bezeichnung
1	Interfels	oval	30 x 15 cm	schwingende Saite	Interfels
1	Glötzl	rund	16 cm	elektrisch	D1
2	Glötzl	rund	12 cm	elektrisch	D2, D3
3	Glötzl	rund	5 cm	elektrisch	D4, D5, D6
1	Glötzl	rechteckig	25 x 15 cm	elektrisch	D7

4.2 Kalibrierung der Druckaufnehmer

Zu Beginn wurden alle Druckaufnehmer kalibriert um sicherzustellen, dass die Messaufnehmer einwandfrei funktionieren. Von den Herstellern wird i.d.R. angegeben, dass die Messergebnisse besonders im niedrigen Druckbereich nicht exakt sein können. Für die Messergebnisse von Laborversuchen, in denen im Normalfall geringere Lasten als in situ aufgebracht werden, kann dies unter Umständen zu großen Abweichungen führen. Vergleichbar mit den Eignungsprüfungen der Hersteller wurden daher alle verwendeten Druckaufnehmer unter Wasser kalibriert. Es konnte nachgewiesen werden, dass die verwendeten Messaufnehmer äußerst präzise sind, und exakt den Wasserdruck anzeigen, der von auf die Membran wirkt. Auch im unteren, von den Herstellern als eventuell nicht exakt betrachteten Spannungsbereich ($<10 \text{ kN/m}^2$), ist kaum eine Abweichung vom aufgetragenen Druck zu erkennen, siehe Abbildung 4.1.

In den Versuchen mit größeren Wassertiefen ergaben sich noch geringere Abweichungen vom Sollwert, sodass die Funktionsfähigkeit der Druckmessdosen gewährleistet ist (siehe Anhang B, Abbildung 2).

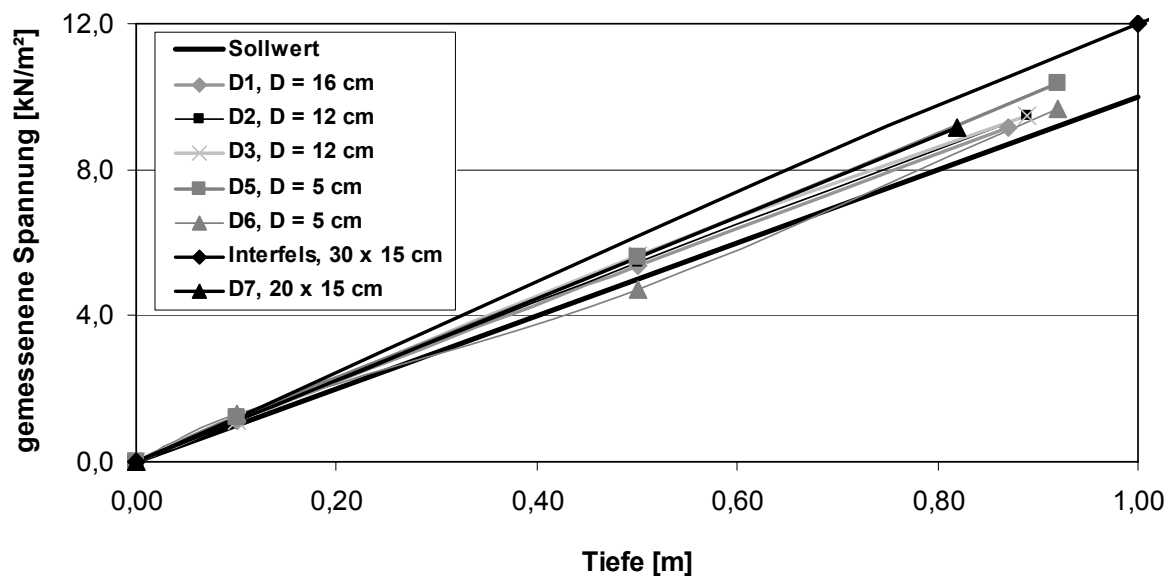


Abbildung 4.1: Kalibrierung der Druckmessdosen

4.3 Bodenmechanische Eigenschaften des Versuchsmaterials

Um die gemessenen Drücke der Druckmessdosen als Funktion der Umgebungsbedingungen ausreichend genau ermitteln zu können, müssen die bodenmechanischen Parameter der Versuchsböden bekannt sein. Alle Versuchsmaterialien wurden hierzu untersucht und klassifiziert.

Zum Einsatz kamen Sande unterschiedlicher Korngrößen sowie ein Tonmehl. In Tabelle 4.2 sind die bodenmechanischen Eigenschaften der Versuchsmaterialien dargestellt.

Tabelle 4.2: Bodenmechanische Parameter der Versuchsböden

Versuchsmaterial	E_s 0–300 kN/m ²	ρ Einbau- dichte	ρ_{\min} min. Dichte	ρ_{\max} max Dichte	W_L	w_P	I_P	Zustands- form
	[kN/m ²]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]	[%]	[%]	[-]
Tonmehl ($w = 32\%$)	7.700	1,78	-	-	35,8	24,6	11,2	breiig
grober Sand (0 – 4 mm)	20.000	1,59	1,56	1,89	-	-	-	-
feiner Sand (0,1 – 0,4 mm)	37.000	1,42	1,40	1,62	-	-	-	-

4.4 Versuchsrandbedingungen

Die Versuche wurden großmaßstäblich durchgeführt, um Randeinflüsse zu minimieren. Um einheitliche Bedingungen zu schaffen, wurde ein Versuchsbehälter mit Abmessungen von $L/$

B/ H: 1,46/ 0,96/ 0,75 m gebaut. Damit ist gewährleistet, dass sich ein homogenes Spannungsfeld im Boden unterhalb der Belastungsplatte aufbauen kann, indem die Druckmessdosen eingebettet sind. In diesem Versuchsbehälter wurde, um eine einheitliche Lagerungsdichte zu erhalten, der Versuchssand lagenweise eingerieselt. Die Druckmessdosen wurden auf ein Planum aufgebracht und die horizontale Lage der Druckmessdose mit einer Wasserwaage sichergestellt. Anschließend wurden die Druckmessdosen mit Boden in unterschiedlichen Lagerungsdichten und unterschiedlichen Höhen überschüttet. Auf diese Schicht wurde die Belastungsplatte aufgelegt. Der vollständige Aufbau besteht weiterhin aus einer kalibrierten Druckmessdose und einer mechanisch betätigten Presse, durch die die Belastung aufgebracht wird. Abbildung 4.2 zeigt einen Überblick über einen eingebauten Versuch mit der hergestellten Widerlagerkonstruktion.

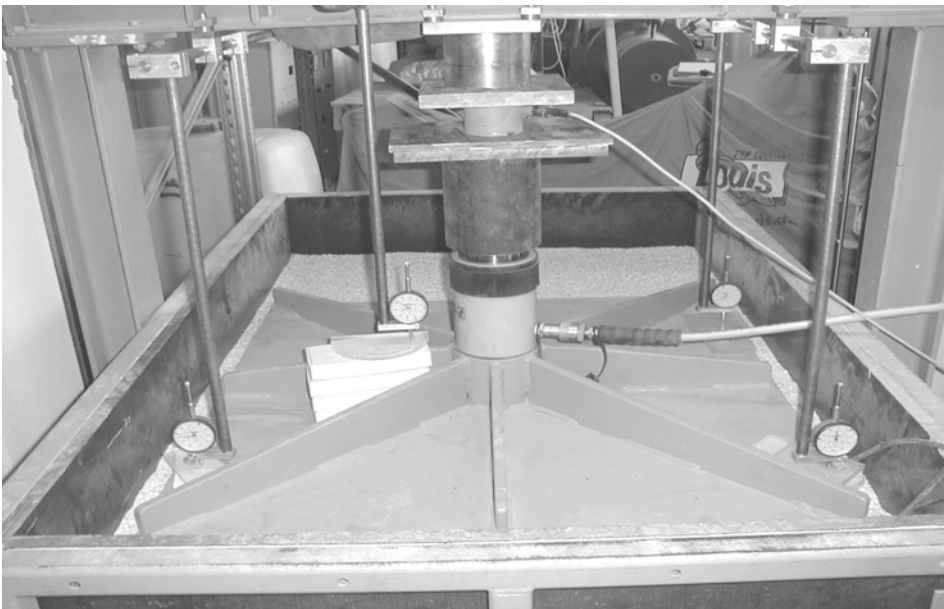


Abbildung 4.2: Versuchsaufbau mit Belastungsplatte und Widerlagerkonstruktion

Die Druckmessdosen wurden in der Regel in einer Tiefe von ca. 12 cm eingebaut, da davon ausgegangen wird, dass sich in dieser Tiefe der Einfluss von Spannungskonzentrationen unter der Belastungsplatte vereinheitlicht hat. An allen Eckpunkten sowie in Plattenmitte wurden die Setzungen gemessen, um eventuelle Schiefstellungen oder Durchbiegungen der Belastungsplatte, die auf Spannungskonzentrationen schließen lassen, zu erfassen.

In allen Versuchen wurden nur sehr geringe Setzungsunterschiede der Belastungsplatte gemessen, die keinen maßgebenden Einfluss auf das Ergebnis besitzen.

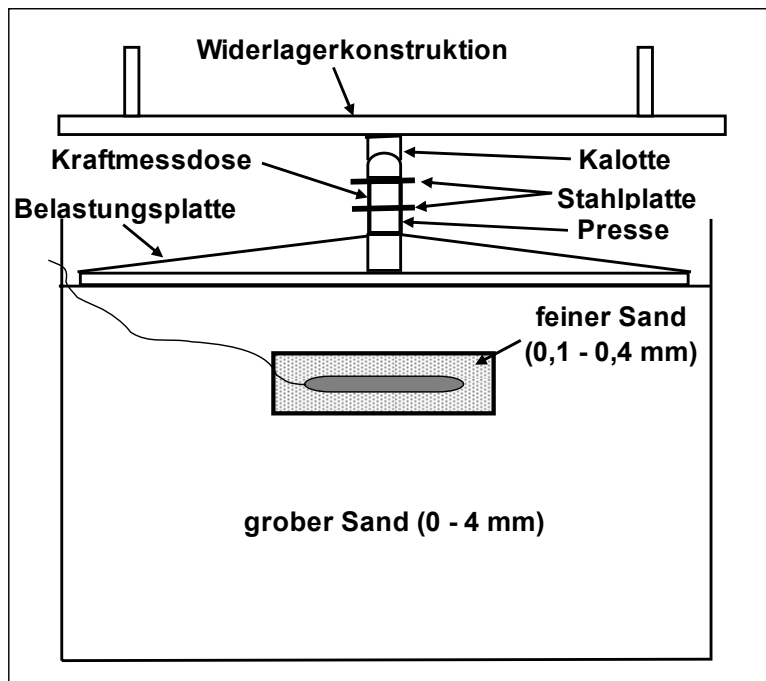


Abbildung 4.3: schematischer Versuchsaufbau

4.5 Vorversuche

4.5.1 Versuche mit kleiner Belastungsplatte

Für die erste Versuchsreihe wurde eine Belastungsplatte mit einer Größe von $0,5 \times 0,5 \text{ m}$ verwendet. Zur Bestimmung der maßgeblichen Einflussfaktoren wurden die Versuche in Einzelversuchen ausgeführt, d.h. es wurde jeweils nur eine Druckmessdose, die unter der Plattenmitte eingebaut wurde, verwendet. Damit kann sichergestellt werden, dass sich die Druckmessdosen nicht gegenseitig in ihrer Wirkung beeinflussen [WEILER, KULHAWY, 1982]. Die Belastung wurde stufenweise in Belastungsschritten von 50 kN/m^2 bis zu einer Maximallast von ca. 200 kN/m^2 aufgebracht, um Abweichungen von dem Sollwert für einzelne Belastungsschritte zu erhalten. Durch die Kenntnis, ab welchem Spannungsniveau die Linien zu stark divergieren, können Rückschlüsse auf das mechanische Verhalten geschlossen werden, z.B. Schiefstellungen der Druckmessdose und steifer oder weicher Einschluss Effekte.

Sowohl die Einbautiefe als auch die Dichte des umgebenden Bodens der Druckmessdose wurden variiert.

4.5.1.1 Versuchsergebnisse

Es zeigte sich bereits in den ersten Versuchen, dass unterschiedlich eingebaute Dichten des gesamten Bodenpaketes über den Druckmessdosen keinen nennenswerten Einfluss auf das Messergebnis haben. Daher wurden keine weiteren Variierungen der Bodendichte vorgenommen.

Die Versuche wurden mit einheitlicher Einbaudichte durchgeführt. Die in Abbildung 4.4 dargestellten Versuchsergebnisse mit der verwendeten Druckmessdose von Interfels zeigen deutliche Unterschiede von gemessener und aufgetragener Spannung. Die gemessene Spannung liegt hierbei um ein vielfaches über der aufgetragenen Belastung. Die gemessenen Spannungen nehmen linear mit aufgetragener Belastung zu. Das Ergebnis lässt ferner erkennen, dass mit zunehmender Tiefe der gemessene Druck abnimmt.

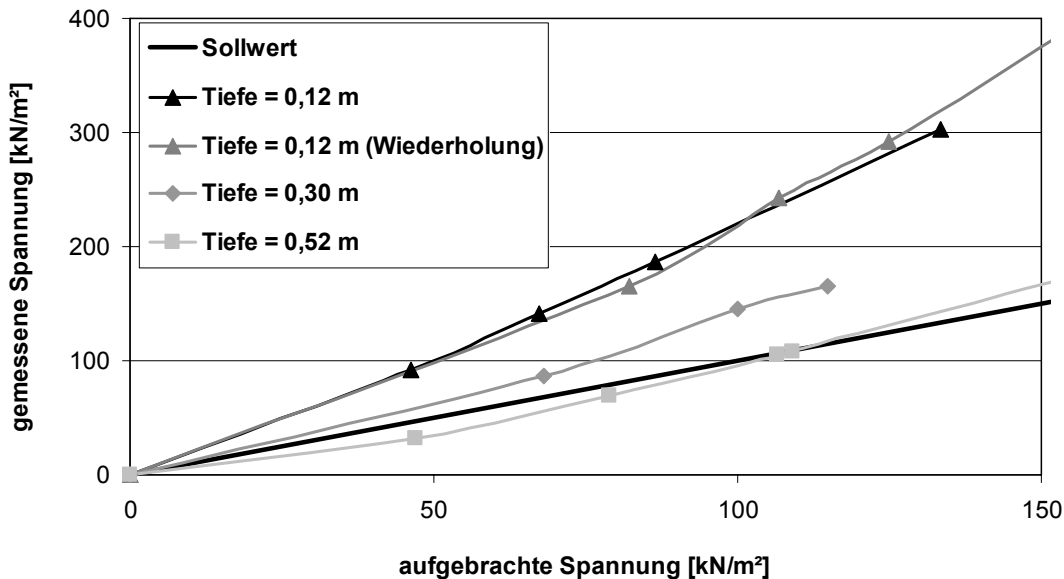


Abbildung 4.4: Verhältnis von gemessener und aufgetragener Belastung, Belastungsplattengröße: 0,5 x 0,5 m, unterschiedlichen Tiefenlagen, Einbettung im groben Sand, Druckmessdose Interfels

Um sicherzustellen, dass dieses Ergebnis nicht ein einzelnes, unrealistisches oder aus falschen Randbedingungen entstandenes Phänomen ist, wurden mehrere Versuche durchgeführt. Die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse ist durch die Ergebnisse der Versuche von Tiefe 0,12 m in Abbildung 4.4 dargestellt.

Zur Ermittlung, ob die zu hohen gemessenen Drücke nur direkt unterhalb der Belastungsplatte vorliegen, wurde die Druckmessdose in unterschiedlichen Tiefenlagen eingebettet. Mit zunehmender Tiefenlage fällt der gemessene Druck ab. Damit konnte nachgewiesen werden, dass die Abmessungen des Versuchsbehälters ausreichend gewählt wurden und es keine Interferenzen von Belastung und Randbedingungen gibt. Der gemessene Druck liegt aber in allen Tiefenlagen immer noch deutlich über den Sollwerten für die entsprechende Tiefe, die hier nicht für alle Tiefenlagen dargestellt sind. Bei allen Versuchen wird ein ähnliches Ergebnis erzielt. Die gemessenen Abweichungen können normiert werden, sodass sich der Einfluss nur aus der Belastungsplattengröße begründen kann, nicht aus den Abmessungen des Versuchsbehälters. In diesem Fall würden sich Veränderungen ergeben, da unterschiedliche Tiefenlagen verschieden beeinflusst werden würden.

Darüber hinaus ergaben sich in den Versuchen große Setzungen (bis max. 10 cm) durch Hebungen des Versuchssandes neben der Belastungsplatte. Anfangs wurde daher vermutet, dass die Ergebnisse durch Schiefstellungen der Druckmessdosen beeinflusst sein könnten. Da die Ergebnisse jedoch eine deutliche Linearität aufweisen, wird davon ausgegangen dass dies für die in dieser Versuchsreihe gewählten Versuchsrandbedingungen einen vernachlässigbaren Parameter darstellt.

Der Verlauf der Messergebnisse stellt nahezu eine Gerade dar. Die geringen Abweichungen der Versuchsergebnisse von einer Geraden sind durch die Erhöhung der Steifigkeit des Bodens (als Folge der Setzungen) zu erklären. Da bei den durchgeführten Versuchen die Abweichungen der Messwerte von den Sollwerten teilweise sehr groß sind, kann die Nichtlinearität einzelner Messwerte vernachlässigt werden.

4.5.2 Variierung der Belastungsplatte

Da die vorgenannten Ergebnisse keine zielführende Aussage zulassen, wurden die Versuchsrandbedingungen variiert. Aufgrund der großen eingetretenen Setzungen wurde eine größere Belastungsplatte, unter der bei den gewählten Versuchsrandbedingungen ein homogeneres Spannungsfeld zu erwarten ist, gewählt. Die neue Belastungsplatte mit Abmessungen von $0,9 \times 0,9$ m belastet fast die gesamte Breite der Versuchskiste und ca. $\frac{2}{3}$ der Länge. Durch die gewählten Abmessungen wird nahezu ein eindimensionaler Belastungszustand, vergleichbar dem Ödometerversuch erreicht. Die Versuchsergebnisse können nicht mehr durch große Lastausbreitung innerhalb des granularen Materials beeinflusst werden, Last- und Spannungsausbreitungen unterhalb der Belastungsplatte müssen daher nicht mehr in der Berechnung berücksichtigt werden; mit der Berechnung einhergehende Unsicherheiten und mögliche Fehlerquellen werden daher ausgeschaltet.

Zu Beginn wurden alle 8 Druckmessdosen unter der Belastungsplatte eingebaut, um Rückschlüsse auf Spannungskonzentrationen und -verteilungen unterhalb der Fundamentplatte zu erhalten, siehe auch [LEUSSINK et al., 1966].

4.5.2.1 Versuchsergebnisse

Die Verteilung der Druckmessdosen und ihrer Bezeichnungen unter der Belastungsplatte ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

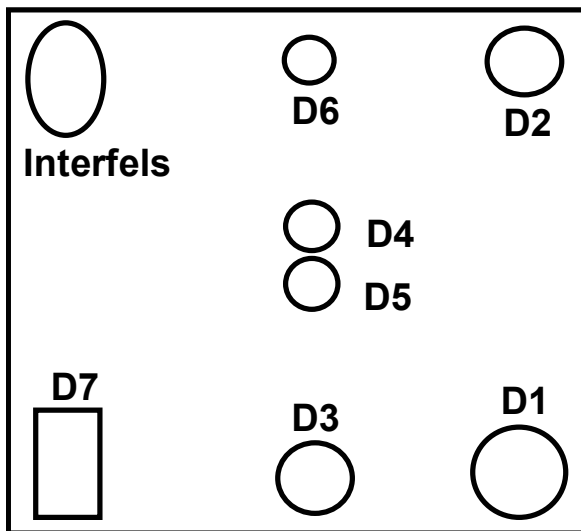


Abbildung 4.5: Lage der Druckmessdosen unter der Belastungsplatte, Plattengröße: 0,9 x 0,9 m

Die Ergebnisse der ersten Versuche mit der neuen Versuchsrandbedingung sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Die Druckmessdosen wurden in ein vollflächiges feines Sandpaket aus 1 cm feinem Sand über und unter den Druckmessdosen eingebettet.

Der Vergleich mit der kleinen Belastungsplatte zeigt, dass die Differenz zwischen aufgebracht und gemessener Spannung deutlich kleiner geworden ist. Das Ergebnis des gemessenen Druckes ist stark von der Position unter der Belastungsplatte abhängig. Dies entspricht den theoretischen Bodenspannungen unter einem starren Fundament.

Alle Druckmessdosen zeigen einen linearen Spannungsanstieg mit zunehmender Belastung. Dies zeigt dass sich bei dieser Belastungsplattengröße keine Effekte aus der Verdichtung des Bodens mehr erfassen lassen; die Versuchsplatte ist ausreichend groß gewählt. Der überproportionale Anstieg der Druckmessdose D5, die die absolut höchsten Spannungen aufzeigt ist wegen der große Spannungskonzentration in der Mitte unterhalb der Druckmessdose.

Die Ergebnisse dieser Versuche lassen keine eindeutige Erkenntnis zu, die gemessenen Abweichungen sind zu groß und zu heterogen. Es lassen sich keine Rückschlüsse auf Steifigkeitsunterschiede einzelner Druckmessdosen o.ä. ermitteln. Aus diesem Grunde wurden weitere Einzelstudien durchgeführt, um die Einflüsse genauer erfassen zu können.

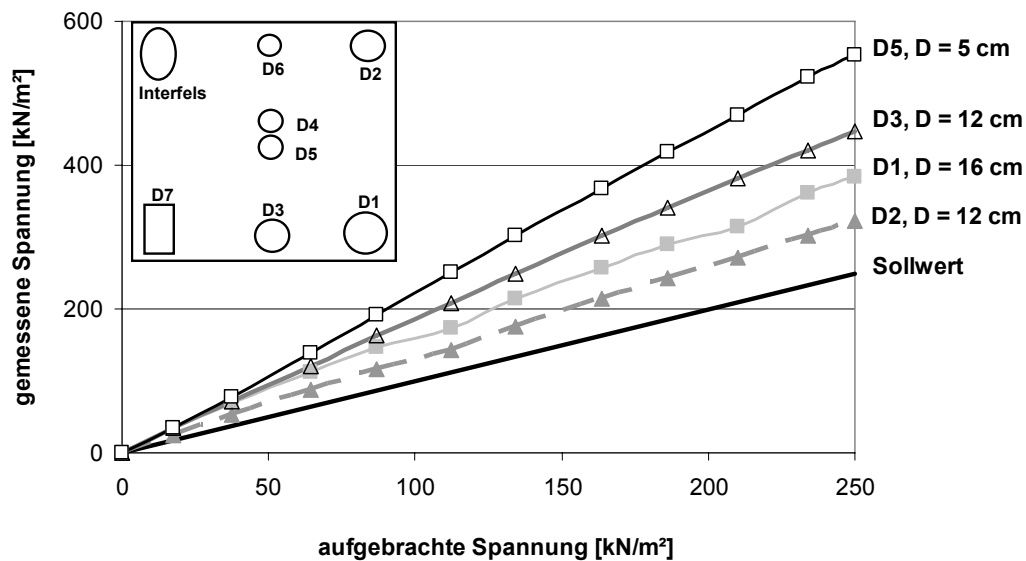


Abbildung 4.6: Verhältnis von gemessener und aufgebrachter Belastung, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m, unterschiedliche Druckmessdosen, Einbettung in feinem Sand

4.6 Variation des Druckmessdosedurchmessers

In der zweiten Versuchsreihe, in die die Erkenntnisse der ersten Versuchsreihe sowie der Parameterstudien eingeflossen sind, wurden die Umgebungsbedingungen der Druckmessdosen systematisch variiert und die Spannungsverteilung unterhalb der Belastungsplatte untersucht. Die Druckmessdosen wurden in Tonmehl, Sande unterschiedlicher Korngrößen und variierten Dichten eingebaut. Um die in Abbildung 2.10 dargestellten Unterschiede der Bodensteifigkeiten auf die Messergebnisse der Druckmessdosen quantifizieren zu können, wurden die Steifigkeiten des die Druckmessdose unmittelbar umgebenden Bodens variiert. Es sollen Grenzwerte, bei denen keine Spannungskonzentrationen (so genannte weicher oder steifer Einschluss Effekte) mehr auftreten, definiert werden.

Für diese Versuche wurden jeweils nur drei Druckmessdosen verwendet, die nahezu gleiche Abmessungen aufweisen. Die Lage der einzelnen Druckmessdosen unter der Belastungsplatte ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Es wurde ein symmetrisches Lastbild gewählt, um einerseits den Spannungsverlauf zu ermitteln, andererseits aber auch einen direkten Vergleich der beiden unter den Eckpunkten der Belastungsplatte eingebauten Druckmessdosen durchführen zu können. Es wurden getrennte Versuche für Druckmessdosen mit einem Durchmesser von 5 cm und 12 cm durchgeführt. Die Nummerierung der Druckmessdosen in Abbildung 4.7 gilt für beide Versuche, D1, D2, D3 stellen hierbei die Druckmessdosen mit einem Durchmesser von $D = 12$, bzw. 16 cm dar, D4, D5, D6 den nachfolgenden Versuch mit einem Druckmessdosedurchmesser von $D = 5$ cm.

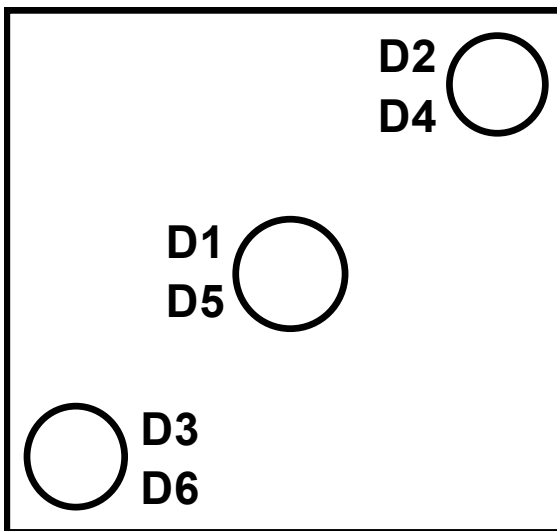


Abbildung 4.7: Lage der Druckmessdosen in der zweiten Messreihe

Bei allen Versuchen wurden die Setzungen der Belastungsplatte an den vier Eckpunkten aufgezeichnet, um Verdrehungen oder Verkantungen der Belastungsplatte zu erfassen. Diese würden zu Spannungskonzentrationen und damit zu hohen gemessenen Drücken führen. Die Ergebnisse aller Setzungsmessungen zeigen deutlich, dass nahezu keine Verkantungen auftreten, bzw. die aufgetretenen geringen Setzungsunterschiede keinen Einfluss auf das Ergebnis der Druckmessdosen haben. Exemplarisch ist in Abbildung 4.8 das Ergebnis einer Setzungsmessung dargestellt. Hieraus geht hervor, dass sich einheitliche Setzungen der gesamten Belastungsplatte ergeben. Die Einschätzung der Messergebnisse der Setzungsmessungen führte dazu, dass den geringen Setzungsdifferenzen keine größere Bedeutung zugemessen werden muss.

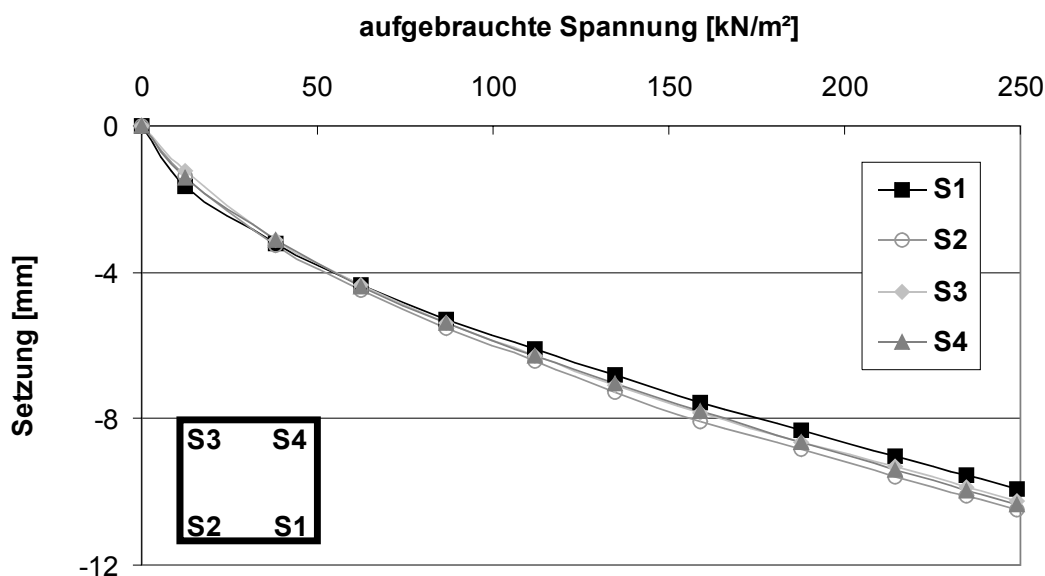


Abbildung 4.8: Setzungen der Belastungsplatte, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m

4.6.1 Druckmessdosen Durchmesser D = 12 cm

Variiert wurden in dieser Versuchsanordnung die die Druckmessdose umgebenden Sande sowie die Dicke der Tonmehlschicht. Die Dicke der Tonmehlschicht wurde variiert, um deutliche Steifigkeitsunterschiede des Bodens in der Umgebung der Druckmessdose und des anstehenden Bodens zu erhalten. Die Korngrößen wurden variiert, um zu untersuchen, ab welchem Korndurchmesser keine einheitliche Belastung des Druckkissens mehr gegeben ist, und die Messergebnisse aus diesem Grund von den aufgetragten Belastungen abweichen.

Zur Ermittlung des Einflusses der Korngröße als auch zur Erzeugung von weichen Einschluss Effekten wurden Tonpakete unterschiedlicher Dicke und deren Auswirkung auf die Messergebnisse der Druckmessdosen untersucht. Tonummantelungen von Druckmessdosen haben darüber hinaus das Vorteil, dass bei ausreichendem Wassergehalt durch die geringe Wasserdurchlässigkeit bei Belastung ein Porenwasserüberdruck erzeugt wird, und somit die Druckmessdose nahezu wie unter den Kalibrierbedingungen der Hersteller durch den Porenwasserdruck belastet wird, dies ist mit Sandumlagerungen nur schwer zu erreichen.

Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10 zeigen die Ergebnisse der einzelnen Versuche mit unterschiedlich großen Körnungen des Versuchssandes. Hierbei ist tendenziell zu erkennen, dass mit zunehmender Korngröße größere Abweichungen vom Sollwert zu verzeichnen sind.

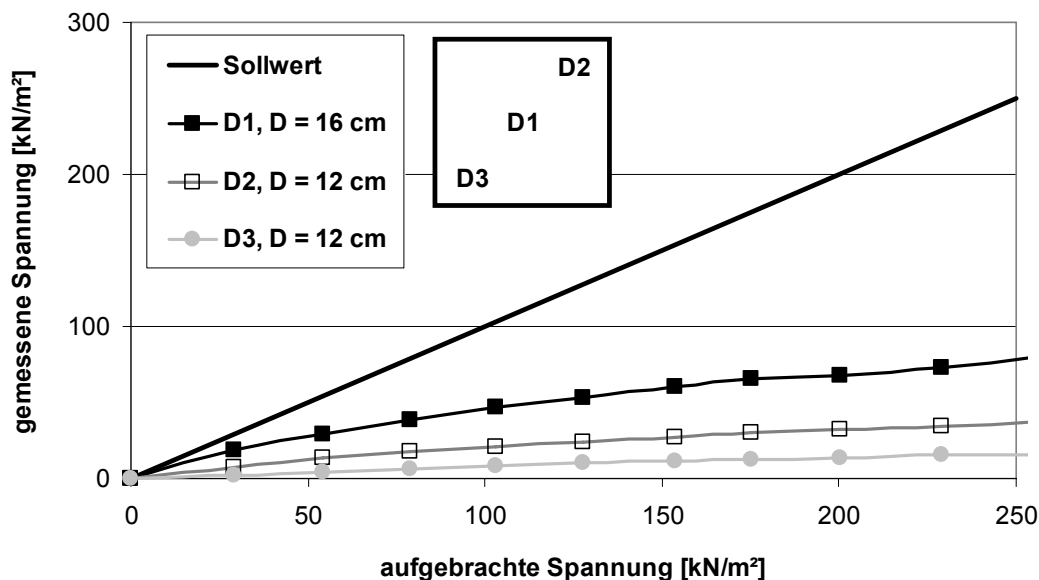


Abbildung 4.9: Verhältnis von gemessener und aufgetragter Belastung, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m, Druckmessdosen D = 12 cm, Einbettung in Ton

Die Ergebnisse der mit Ton ummantelten Druckmessdosen sind deutlich geringer als der Sollwert. Dies ist der so genannte weiche Einschluss Effekt, der zu einer verminderten gemessenen Spannung führt. Mit abnehmender Dicke der Tonummantelung nimmt dieser

Effekt ab. Wird eine über die gesamte Fläche der Versuchskiste durchgehende Tonschicht eingebaut ist dieser Effekt nicht mehr feststellbar. Allerdings stimmen auch hier die gemessenen Drücke nicht mit den aufgetragenen überein.

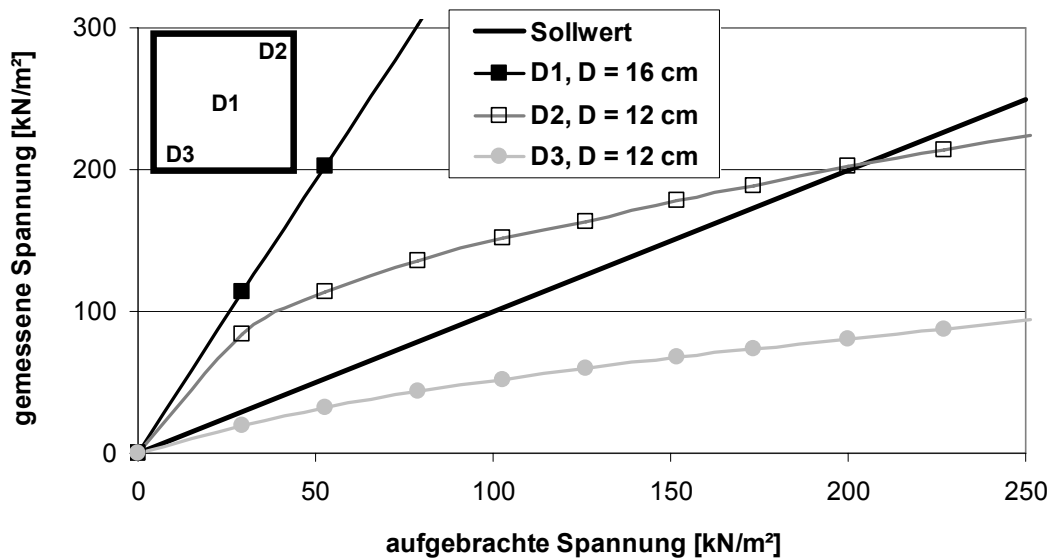


Abbildung 4.10: Verhältnis von gemessener und aufgetragener Belastung, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m, Druckmessdosen D = 12 cm, Einbettung in feinem Sand

Für eine Bauwerksinstrumentierung muss sichergestellt werden, dass keine großen Steifigkeitsunterschiede zwischen anstehendem und als Auflagerung für die Druckmessdose verwendetem Material bestehen. Es muss darüber hinaus gewährleistet werden, dass die Druckmessdosen vollflächig belastet werden und die Druckmessdose das vorhandene Spannungsniveau so gering wie möglich beeinflusst. Zum Beispiel werden bei der Spannungsermittlung im Fels die Druckmessdosen in eine Mörtelschicht eingebettet, die nahezu gleiche Steifigkeiten wie der Fels aufweist. Hier wird im Allgemeinen eine recht gute Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt.

Die Druckmessdosen wurden unten und oben mit einer 3 cm dicken feinen Sandschicht ummantelt. Dadurch lässt sich die Nichtlinearität im unteren Spannungsbereich und die Abweichungen von Abbildung 4.6 erklären, wo die Druckmessdosen nur in eine 1 cm feine Sandschicht über und unter der Dose eingebettet wurden.

Die Versuchsergebnisse der Einbettungen im Ton oder im feinen Sand liefern für alle Betrachtungen unrealistische Werte. Bei den im Sand eingelagerten Druckmessdosen sind tendenziell größere Spannungen als im Ton gemessen worden. Der verwendete feine Sand kann in seiner Lagerungsdichte nur gering verändert werden, der Steifigkeitsunterschied zum restlichen in der Versuchskiste eingebauten Boden ist sehr gering, weicher Einschluss Effekte werden kaum festgestellt.

Auffällig bei der Einbettung der Dosen im Sand ist die deutliche Nichtlinearität im unteren Spannungsbereich, die Spannungsabnahme deutet auf eine Auflockerung des Bodens hin. Vermutlich hat sich durch die geringe Dicke der feinen Sandschicht hier der Boden in das anstehende gröbere Material eingelagert.

Auffällig ist, dass die Druckmessdosen unter den Ecken der Belastungsplatte vergleichbarere Druckwerte liefern. Die gemessenen Drücke direkt unterhalb der Platte weichen stark von diesen Ergebnissen ab. Dies ist für die Einbettung im Ton als auch im Sand erkennbar.

4.6.2 Druckmessdosendurchmesser $D = 5\text{ cm}$

Die gleichen Versuche wurden mit Druckmessdosen mit einem Durchmesser von $D = 5\text{ cm}$ durchgeführt. Ziel dieser vergleichenden Untersuchung ist es, den Einfluss der Steifigkeit der Druckmessdose im Verhältnis zur Steifigkeit des umgebenden Bodens auf das Messergebnis zu ermitteln.

Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 zeigen den Versuchsaufbau der dick mit Ton ummantelten Druckmessdosen.

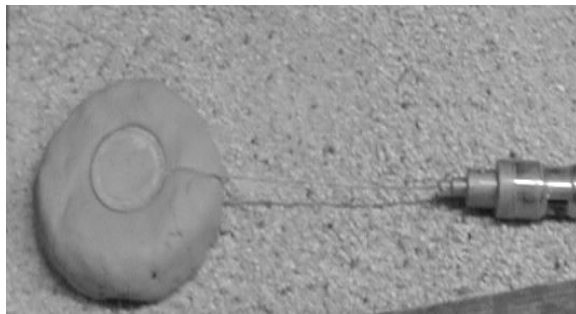


Abbildung 4.11: Auflagerung auf Ton

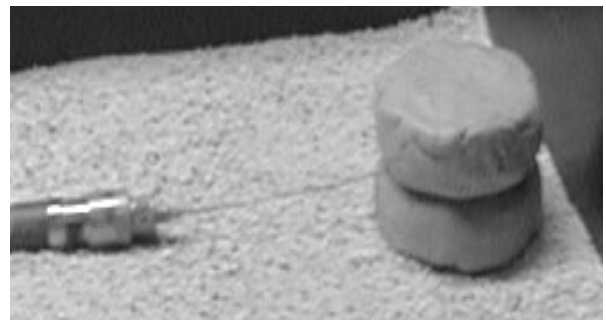


Abbildung 4.12: Fertige Ummantelung

Die Versuchsergebnisse zeigen hierbei deutlich, dass die Ergebnisse der kleinen Belastungskissen noch mehr von der Korngröße des umlagernden Materials beeinflusst sind. Je gröber das Material wird, umso größere Abweichungen der Ergebnisse werden gemessen, siehe Abbildung 4.13 und Abbildung 4.14. Die Druckmessdosen in Abbildung 4.13 wurden wiederum in eine oben und unten 3 cm dicke Tonschicht gebettet, wohingegen die Versuchsergebnisse in Abbildung 4.14 in eine 3 cm dicke feine Sandschicht eingebetteten Druckmessdosen ermittelt wurden.

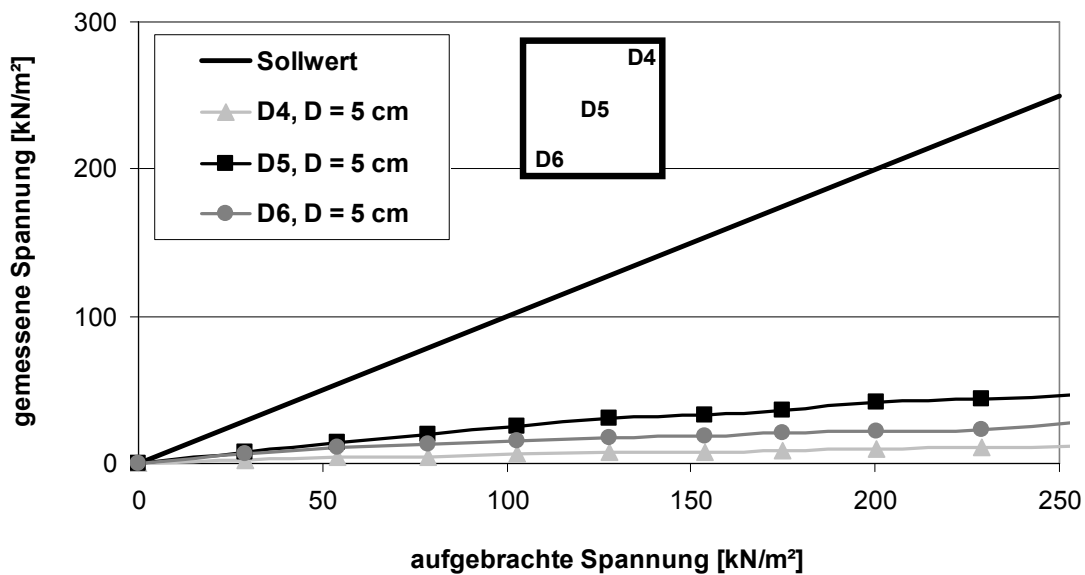


Abbildung 4.13: Verhältnis von gemessener und aufgebrachter Belastung, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m, Druckmessdosen $D = 5$ cm, Einbettung in Ton

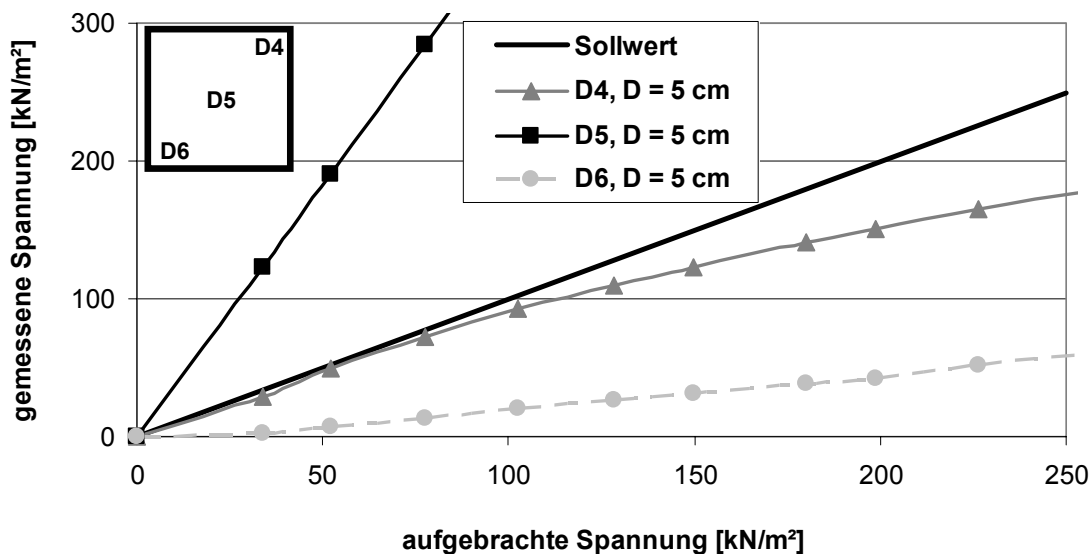


Abbildung 4.14: Verhältnis von gemessener und aufgebrachter Belastung, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m, Druckmessdosen $D = 5$ cm, Einbettung in feinem Sand

4.6.3 Vergleich der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass im feinen Sand größere Spannungen gemessen werden als bei der Einbettung im Ton. Der Verlauf der gemessenen Drucklinien ist für die Druckdosen im Ton deutlich einheitlicher, bei der Einbettung im Sand sind deutliche Schwankungen und Abweichungen von einer Geraden zu beobachten, anscheinend ist bei der Einbettung im Sand die Installation der Druckmessdosen noch sensibler.

Durch die Dicke der Tonschicht wird ein weicher Einschluss Effekt erzielt. Die Steifigkeitsunterschiede von Ton zu anstehendem Boden mit einer Körnung von 0 – 4 mm sind zu groß.

Darüber hinaus ist auffällig, dass bei beiden Versuchen, tendenziell gleiche Erscheinungen gemessen werden: die in der Mitte liegende Druckmessdose misst die höchsten Drücke, die unter den Ecken liegenden Druckmessdosen messen geringere Spannungen. Theoretisch müssten die Spannungen unter den Eckpunkten gleich sein, die Änderungen können sich durch Lageungenauigkeiten, oder Spannungskonzentrationen unter der Belastungsplatte, hervorgerufen durch unterschiedliche Setzungen, ergeben haben.

Aus den vorgenannten Ergebnissen lässt sich erkennen, dass die Größe, bzw. die Steifigkeit der Druckmessdose einen geringen, aber doch messbaren Einfluss auf das Messergebnis hat. Hierbei ist zu verzeichnen, dass mit zunehmender Größe der Druckmessdose auch die gemessenen Drücke ansteigen.

4.7 Spannungsverteilung unter der Belastungsplatte

Da sich jedoch ein sehr uneinheitliches Spannungsbild unter der Druckmessdose ergibt, wurde eine weitere Versuchsreihe mit einer größeren Anzahl von Druckmessdosen unter der Belastungsplatte durchgeführt. Dadurch ist besser gewährleistet, einen genaueren Spannungsverlauf unter der Belastungsplatte zu ermitteln. Zusammen mit den Ergebnissen der Setzungsmessungen können dann Rückschlüsse auf die Verformung der Belastungsplatte und daraus resultierende Spannungskonzentrationen unter der Platte abgeleitet werden. Da sich in den vorhergehenden Versuchsreihen gezeigt hat, dass die Druckmessdosengröße nur einen sehr geringen Einfluss auf das Messergebnis hat, wurden hierzu Druckmessdosen unterschiedlicher Durchmesser verwendet. Diese wurden wie in Abbildung 4.15 dargestellt wieder diagonal unter der Belastungsplatte verteilt. Zur Ermittlung des Spannungsverlaufes am Rand wurde zusätzlich eine Druckmessdose unter die Mitte der Längsseite gelegt. Die Lage der einzelnen Druckmessdosen unter der Belastungsplatte ist in Abbildung 4.15 dargestellt.

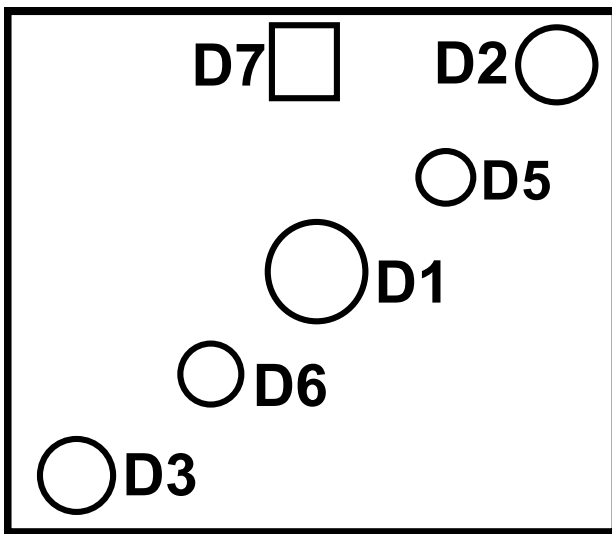


Abbildung 4.15: Lage der Druckdosen

Die Druckmessdosen wurden in dieser Versuchsreihe in Ton (1 cm starke Schicht unter und über der Druckmessdose) eingebettet.

Da sich in den vorhergehenden Untersuchungen anscheinend eine Abhängigkeit der Ergebnisse von den Setzungen und Deformationen der Fundamentplatte ergeben hat, wurde bei dieser Untersuchung besonderer Wert auf die Betrachtung der Setzung der Belastungsplatte gelegt, um die ermittelten Spannungen damit vergleichen zu können. Abbildung 4.16 stellt die gemessenen Setzungen über die Belastungsplattendiaagonale dar.

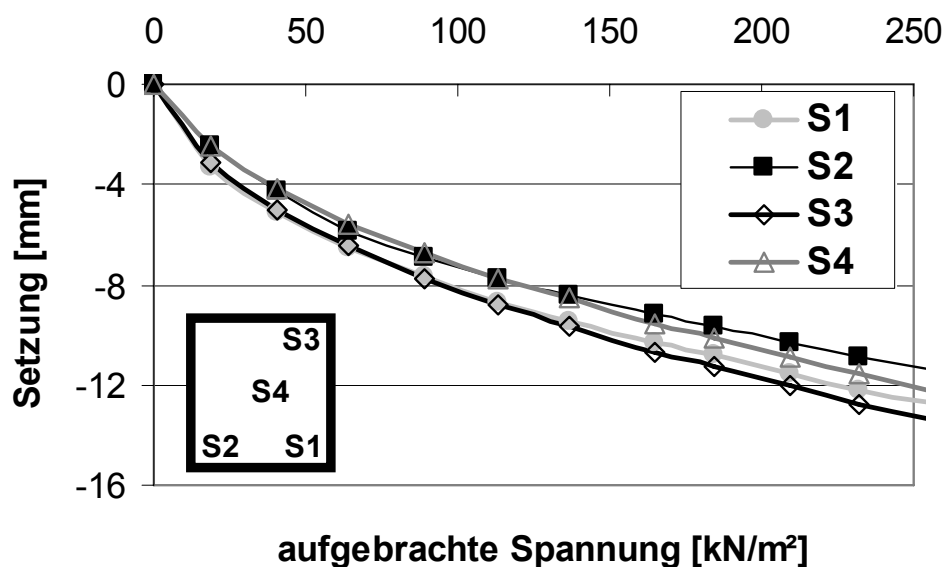


Abbildung 4.16: Setzung der Belastungsplatte

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich eine geringfügige Schiefstellung der Belastungsplatte ergibt. Die Größe der Setzungen über die Diagonale lässt weiter vermuten, dass zusätzlich eine geringe Durchbiegung der Belastungsplatte eingetreten ist, sodass die Setzungswerte

der Messgeber S2 und S4 nahezu identisch sind. Abbildung 4.17 stellt die Setzung im Schnitt durch die Diagonale S2 – S4 – S3 dar. Demzufolge müsste die unter der Messuhr S2 liegende Druckmessdose geringere Spannungen erfassen, wohingegen unter S3 die größten Spannungen zu erwarten sind (Abbildung 4.18).

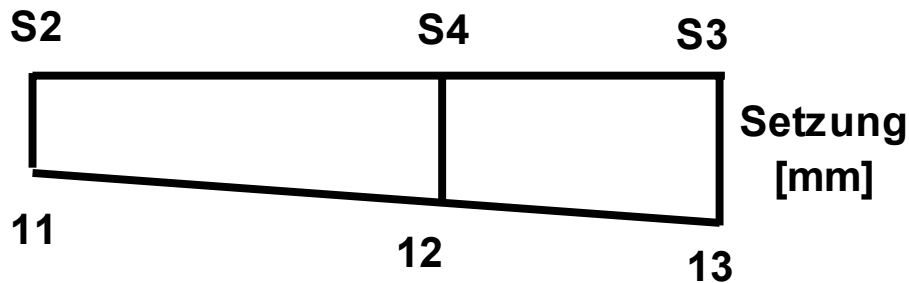


Abbildung 4.17: Setzungen im Schnitt S2 – S4 – S3

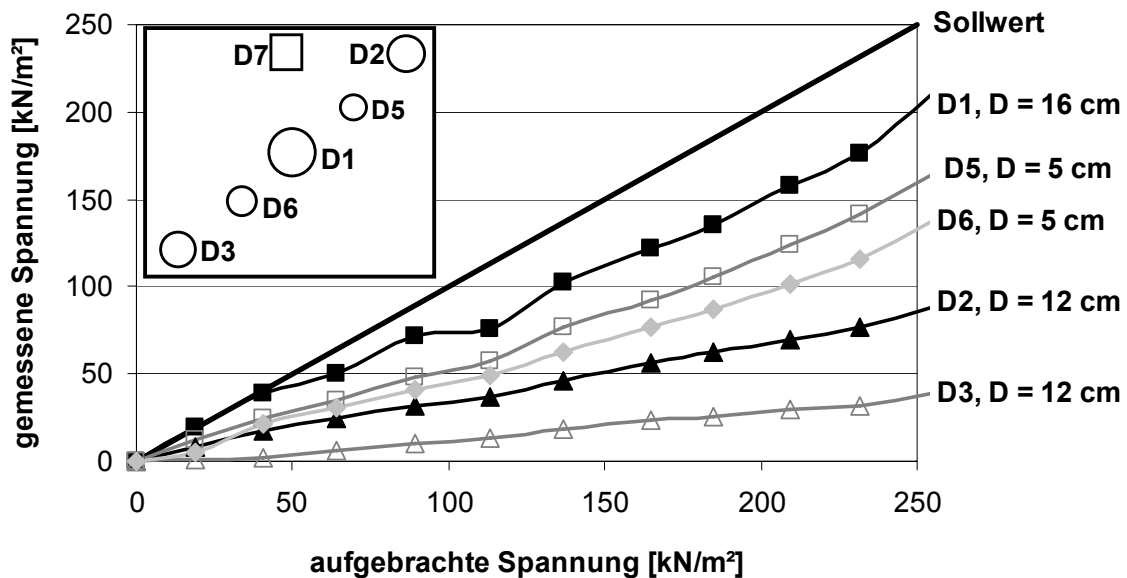


Abbildung 4.18: gemessene Spannungsverteilung, Belastungsplatte: $0,9 \times 0,9 \text{ m}$

Die gemessene Spannungsverteilung bestätigt die gemachten Aussagen: unter den Bereichen mit den größten Setzungen werden die größten Spannungen gemessen, zusätzlich ergibt sich durch die geringfügige Durchbiegung der Platte eine Spannungskonzentration in Plattenmitte (Abbildung 4.18). Der genaue Verlauf der gemessenen Spannungen bei einer aufgebrachten Belastung von 230 kN/m^2 ist in Abbildung 4.19 graphisch dargestellt.

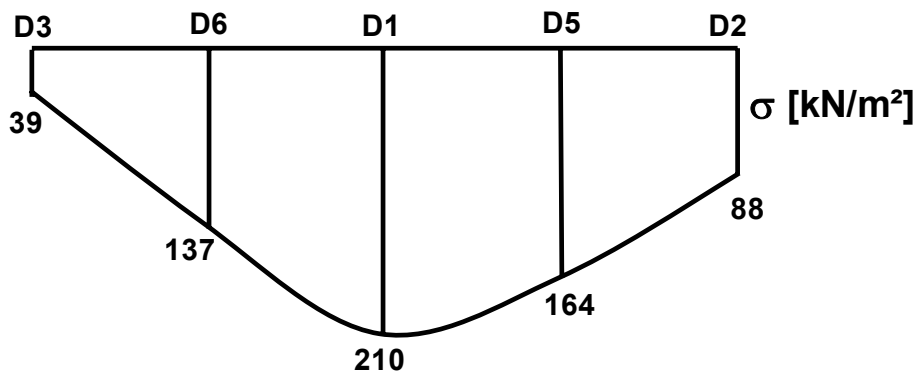


Abbildung 4.19: Spannungsverlauf im Schnitt S2 – S4 – S3

Aus dem Ergebnis kann für die Untersuchungen eine extreme Abhängigkeit von der Verformung der Belastungsplatte, demzufolge der Plattensteifigkeit gefolgert werden. Weitergehende Betrachtungen müssen daher versuchen, die Plattensteifigkeit soweit zu erhöhen, dass sich keine Durchbiegungen ergeben können, Spannungskonzentrationen unter Eckpunkten abgebaut werden und Schiefstellungen durch eine genaue Lagekontrolle der Bodenschicht, auf die die Belastungsplatte aufgebracht wird, verhindert werden.

Da nachgewiesen werden konnte, dass die Spannungsverteilung unterhalb der Belastungsplatte nicht annähernd linear verläuft, wurden Untersuchungen durchgeführt, wie die Spannungsspitzen unter der Belastungsplatte minimiert werden können. Es wurden Parameterstudien zum Einfluss der Steifigkeit der Belastungsplatte durchgeführt. Ziel ist es ein einheitliches Spannungsniveau unter der Belastungsplatte zu erreichen. Unterschiedliche Materialien, die unter die Belastungsplatte gelegt wurden, wurden auf ihre Tauglichkeit geprüft. Ziel dieser Studie ist es Spannungskonzentrationen unter der Belastungsplatte zu verhindern.

Es wurden Gummi-, Polystyrol- und Drainagematten unter der Belastungsplatte aufgelegt und auch einige Versuche in einen anderen Versuchsbehälter und im Biaxialgerät durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anhang B, Abbildung 3 bis Abbildung 8, dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine geringfügige Verbesserung der gemessenen Spannungen im Vergleich zu den aufgebrachten beim Einsatz Gummimatten und Drainagematte. Aber die Ergebnisse von Einsatz Polystyrolmatten zeigen, dass die von KÜGLER und JUNG [2001] ermittelten Ergebnisse, die durch einen geringfügig anderen Aufbau erreicht wurden, nicht nachvollzogen werden können.

4.8 Einfluss der Steifigkeit der Messelemente

Um den Einfluss der Systemsteifigkeit Druckmessdose mit Ummantelung zum umgebenden Boden zu erfassen, wurden Versuche mit unterschiedlichen Abmessungen der Druckmessdosen und verschiedene Ummantelungen durchgeführt.

Es wurden jeweils 4 Druckmessdosen verwendet, die an den Stellen unter der Belastungsplatte eingebaut wurden, wo sich jeweils gleiche Spannungen ergeben. Die Ergebnisse mit einer Ummantelung aus feinem Sand (siehe Tabelle 4.2) sind in Abbildung 4.20 und Abbildung 4.21 dargestellt.

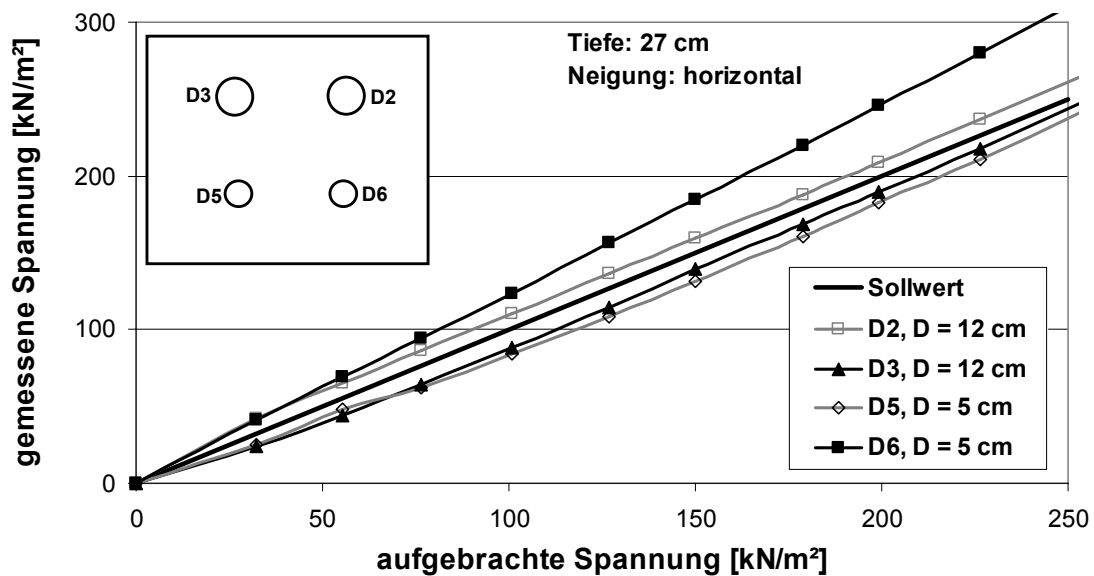


Abbildung 4.20: Verhältnis von gemessener und aufgebrachter Belastung, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m, Einbettung in feinem Sand

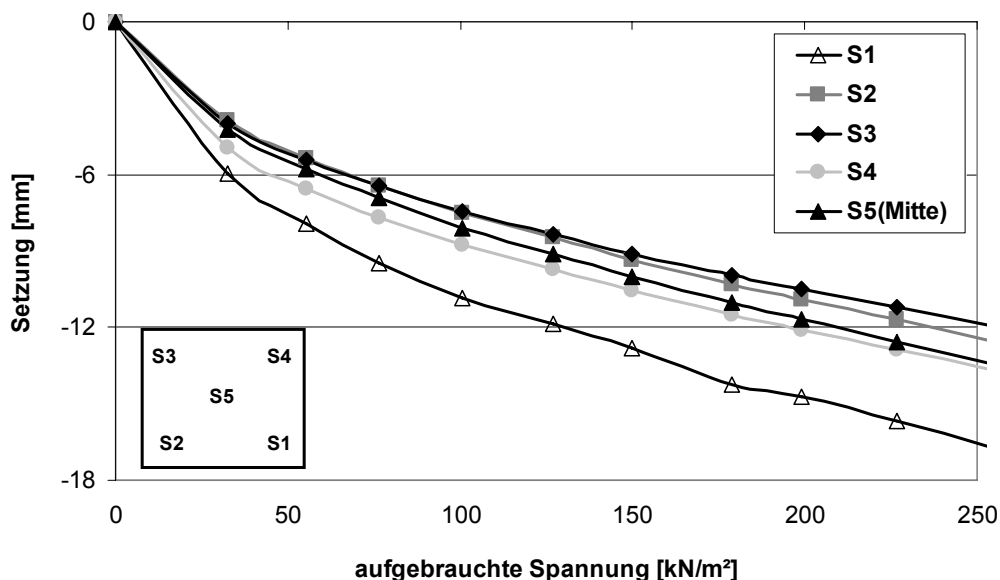


Abbildung 4.21: Setzung der Belastungsplatte

Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen aufgebrachten und gemessenen Spannungen für alle 4 Druckmessdosen ($D = 5 \text{ cm}$ und $D = 12 \text{ cm}$). Die geringe Abweichung der Druckmessdose D6, liegt an der größeren Setzung der Belastungsplatte S1 in diesem Bereich.

Bei einer Einbettung der Druckmessdosen in gröberen Sand ergeben sich deutlichere Abweichungen zwischen aufgetragenen und gemessenen Werten (siehe Abbildung 4.22)

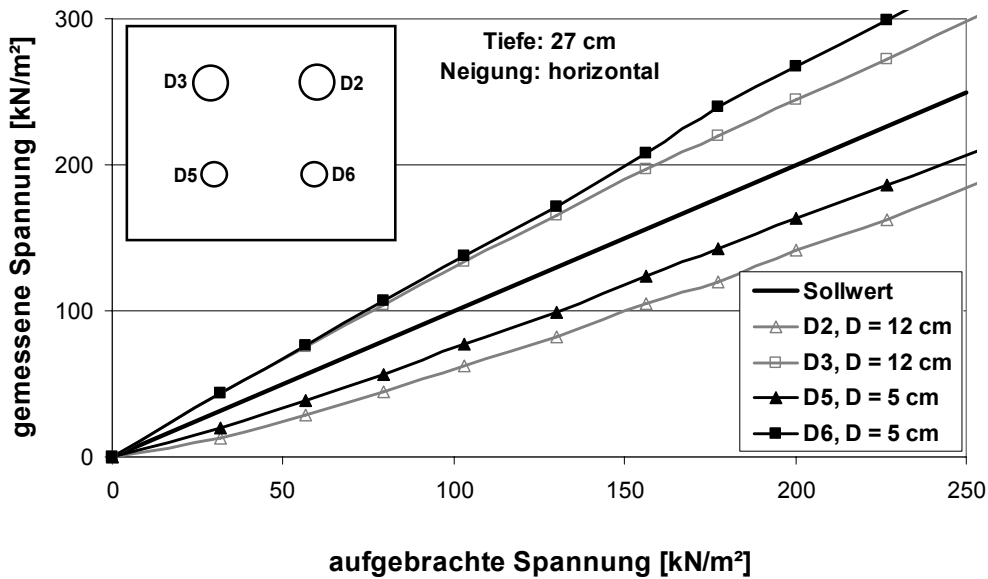


Abbildung 4.22: Verhältnis von gemessener und aufgetragener Belastung, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m, Einbettung im groben Sand

In Abbildung 4.23 ist das Ergebnis bei einer Einbettung in Ton dargestellt. Hier ergeben sich die geringsten gemessenen Spannungen, da die Systemsteifigkeit gegenüber dem umgebenden Boden sehr klein ist (weicher Einschluss Effekt).

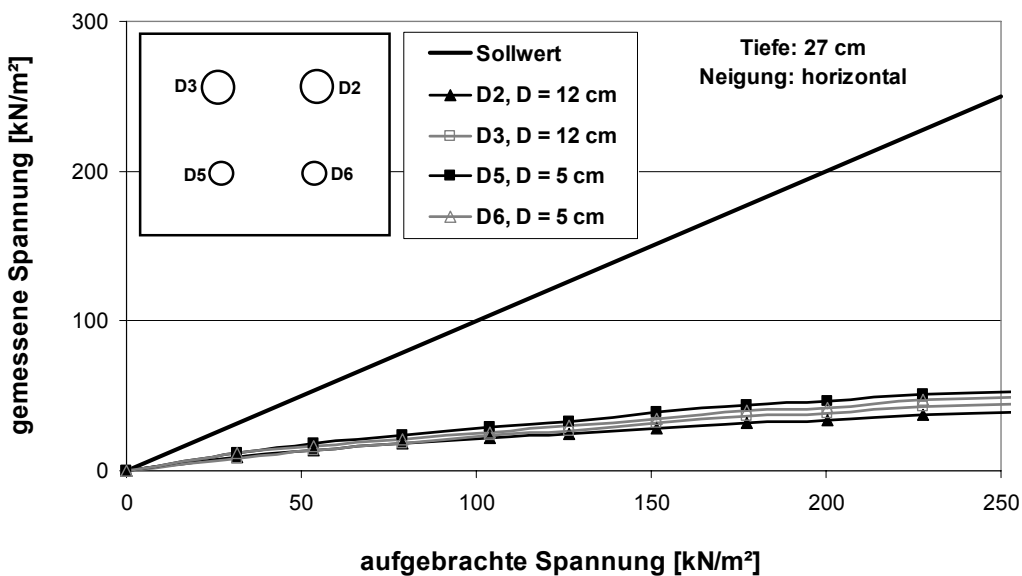


Abbildung 4.23: Verhältnis von gemessener und aufgetragener Belastung, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m, Einbettung in Ton

4.9 Einfluss der Lageneigung

Zur Ermittlung des Einflusses Neigung der Druckmessdosen wurde eine Druckmessdose an gleicher Position mit unterschiedlichen Neigungen eingebaut. Die Neigungen wurden planmäßig in 5° Schritten erhöht. Die Ummantelung der Druckmessdose erfolgte mit feinem Sand. Durch Variation der Neigung verändert sich die senkrecht zur Druckmessdose wirkende effektive Spannung. Die Ergebnisse der Untersuchung in einer Druckmessdosenposition stellt Abbildung 4.24 dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass selbst bei einer Neigung von 10°, kaum Änderungen der Messwerte entstehen. Trotz der geringen Unterschiede ist für die Bauausführung zu empfehlen, die Druckmessdosen möglichst horizontal einzubauen. Treten nachfolgend Abweichungen von der Solllage ein, ist jedoch mit Veränderungen der Spannungen zu rechnen.

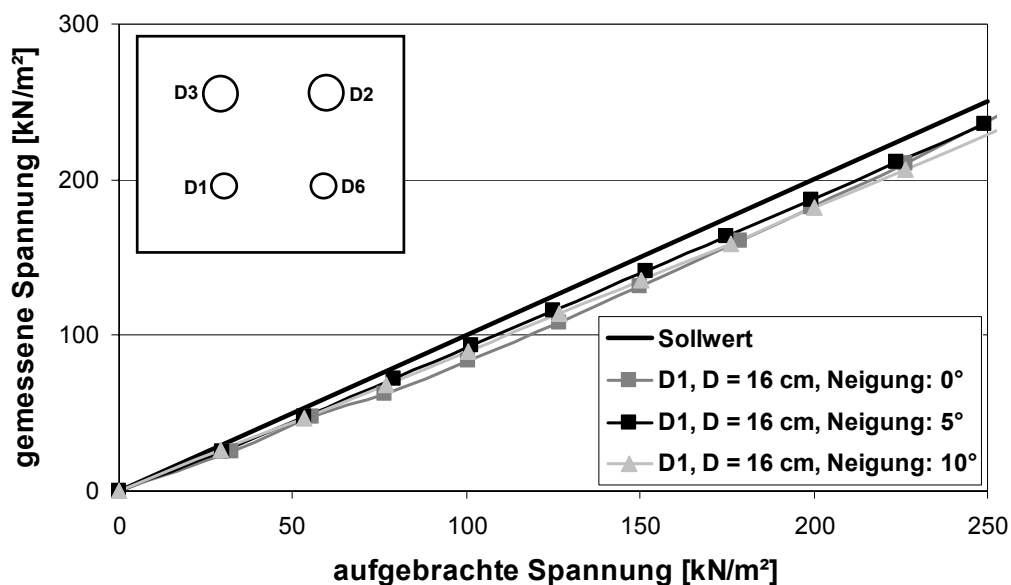


Abbildung 4.24: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, Einfluss der Neigungsänderung

4.10 Einfluss der Temperatur

Durch den Abbindeprozess des Betons oder jahreszeitliche Schwankungen kann es in der Nähe der Druckmessdosen zu Temperaturunterschieden kommen. Zur Korrektur werden von den Herstellern Temperaturfaktoren angegeben, mit denen die Auswirkung auf den Messgeber, nicht jedoch auf die Druckmessdose ermittelt werden kann. Zur Ermittlung des Einflusses variierender Temperaturen auf die Druckmessdosen wurden unterschiedliche Druckmessdosen eingebaut. Durch Wärmeschläuche wurde eine künstliche Temperaturerhöhung erzeugt. Nach Stabilisierung der Umgebungstemperatur wurde eine mehrstufige Belastung durchgeführt.

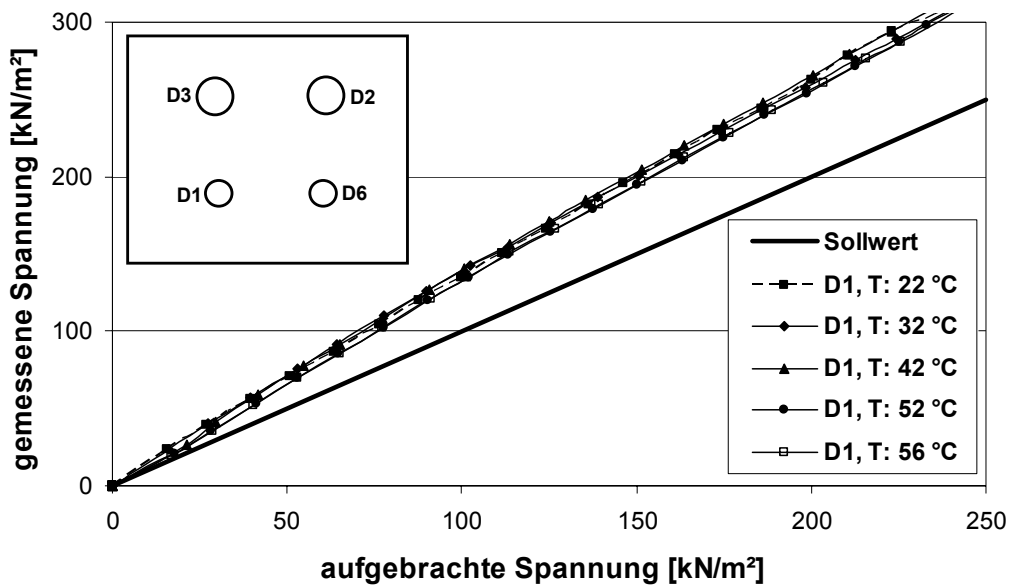


Abbildung 4.25: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, Variierung der Temperatur

Die von den Herstellern angegebenen Temperaturfaktoren sind in den Messergebnissen bereits berücksichtigt. Wie in Abbildung 4.25 dargestellt, ergeben sich selbst bei extremen Temperaturschwankungen nur minimale Änderungen der gemessenen Spannungen. Die Abweichung vom Sollwert entstehen durch die gewählte Ummantelung der Druckmessdose und sind unabhängig von der Umgebungstemperatur. Bei vorgegebenen Umlagerungsbedingungen besteht keine Beeinflussung durch die Umgebungstemperatur.

4.11 Beeinflussung durch umliegende Druckmessdosen

Zur Ermittlung der gegenseitigen Beeinflussung wurden Versuche mit drei Druckmessdosen D1 (D = 16 cm), D2 und D3 (D = 12 cm) durchgeführt, bei denen der horizontale Abstand verändert wurde. Je kleiner der Abstand zwischen den Druckmessdosen wird, desto geringer werden die gemessenen Spannungen der Druckmessdose D1, die konstant in einer Position liegt. Eine zu nahe Lage der Druckmessdosen erzeugt eine abschirmende Wirkung, siehe Abbildung 4.26 (die Änderung der Ergebnisse für D2 und D3 sind in Anhang B, Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellt).

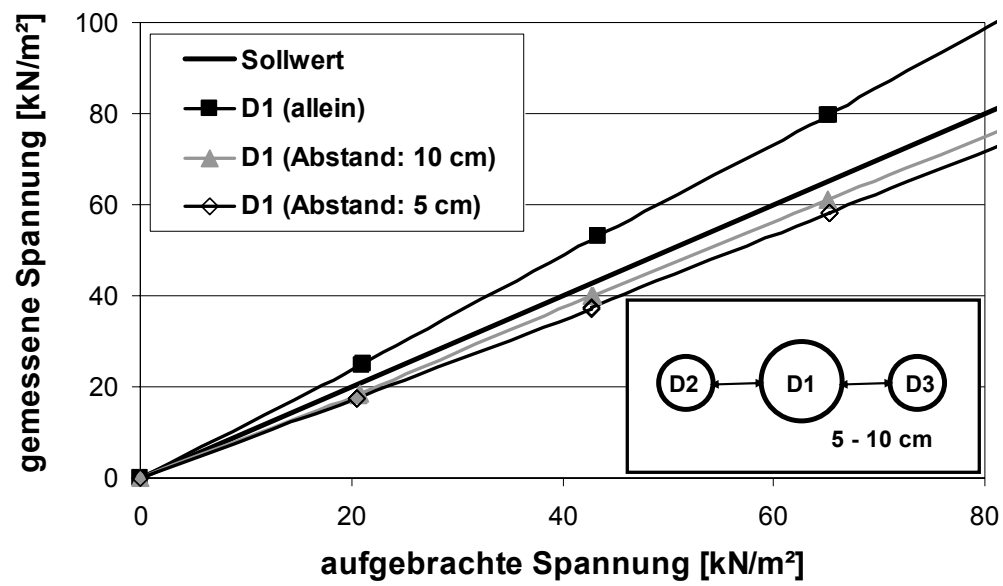


Abbildung 4.26: Beeinflussung der Messwtergebnisse bei mehreren Druckmessdosen

5 Die Auswirkungen der Verwendung der Ummantelung auf die Ergebnisse der Druckmessdosen

Idealerweise sollte das Design einer Druckmessdose veränderbar sein, um den verschiedenen Arten der Installation, sowie den variierenden Steifigkeiten der umgebenen Böden gerecht zu werden. Ein Versuch, so eine Druckmessdose zu konstruieren, wäre sehr schwierig, da die Steifigkeit von Böden stark variiert. Darüber hinaus führt eine derartige Konstruktion zu sehr hohen Kosten. Stattdessen bieten die Hersteller einige verschiedene Typen von Druckmessdosen an, die für einen Großteil der Anwendungen einsetzbar ist [DUNNICLIFF, GREEN, 1993].

Es ist bekannt, dass Druckmessdosen aus Metall auf Grund ihrer Steifigkeit nicht in der Lage sind, Spannungen im Boden korrekt zu messen. Wegen der großen Differenz zwischen der Steifigkeit der Druckmessdose und des umgebenen Mediums gibt es oft erhebliche Abweichungen zwischen der gemessenen und der bestehenden Spannung. Es ist oft nicht möglich eine Druckmessdose mit einer, dem umgebenen Medium angepassten Steifigkeit herzustellen. Aus diesem Grund bietet es sich an, eine Ummantelung mit geeigneter Steifigkeit und entsprechender Größe vorzusehen. Wenn die Ummantelungszone um die Druckmessdose weniger steif als der umgebene Boden ist, wird die reale Spannung unterschätzt. Ist die Ummantelungszone steifer als der umgebene Boden, werden die realen Spannungen überschätzt. Eine Ausnahme bilden feuchte, weiche Böden. Bei solchen Bedingungen kann sich ein nahezu hydrostatischer Spannungszustand einstellen. In dieser Situation können Spannungen ohne weitere Hilfsmittel verlässlich ermittelt werden. [KIRBY, 1998]

Wie im Kapitel 4 ausführlich dargestellt, ergeben sich zwischen ermittelten und erwarteten Messergebnissen geotechnischer Messinstrumente große Abweichungen.

Bei der Spannungsermittlung im Untergrund müssen vielfältige Parameter beachtet werden, um ein theoretisch störungsfreies Spannungsfeld zu erzeugen, indem die Genauigkeit der Messinstrumente bei variierenden Umgebungsbedingungen ermittelt werden können. Insbesondere die Lasteinleitung und das Verhältnis der Steifigkeit von Versuchsboden und Messelement sind zu beachten, um Spannungskonzentrationen im Boden zu verhindern. Unter hydrostatischen Bedingungen wurde die Genauigkeit der Druckmessdosen nachgewiesen.

Die in Tabelle 4.1 dargestellten Messelemente wurden auch für diese Versuchsreihe verwendet.

5.1 Randbedingungen

Die Versuche wurden in einer Versuchsbox mit Abmessungen von Länge/ Breite/ Höhe: 1,50/ 0,60/ 0,75 m durchgeführt. Die Belastung erfolgt mittels zwei pneumatischen.

Zusätzlich zur aufgetragenen Last wird die am Boden des Versuchsgesäßes wirkende Spannung durch Kraftmessdosen ermittelt. Aus dem Vergleich der aufgetragenen und der gemessenen Spannung wird die in der Ebene der Messelemente wirkende Spannung berechnet. Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2 zeigen die Versuchbox und den schematischen Versuchsaufbau.

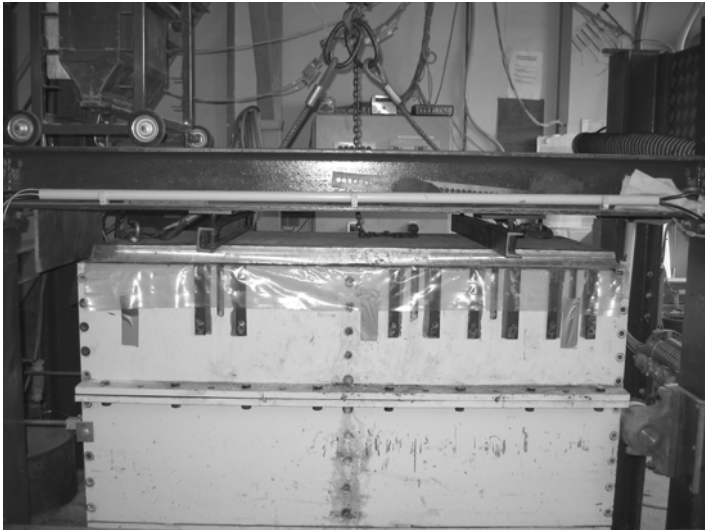


Abbildung 5.1: Versuchbox

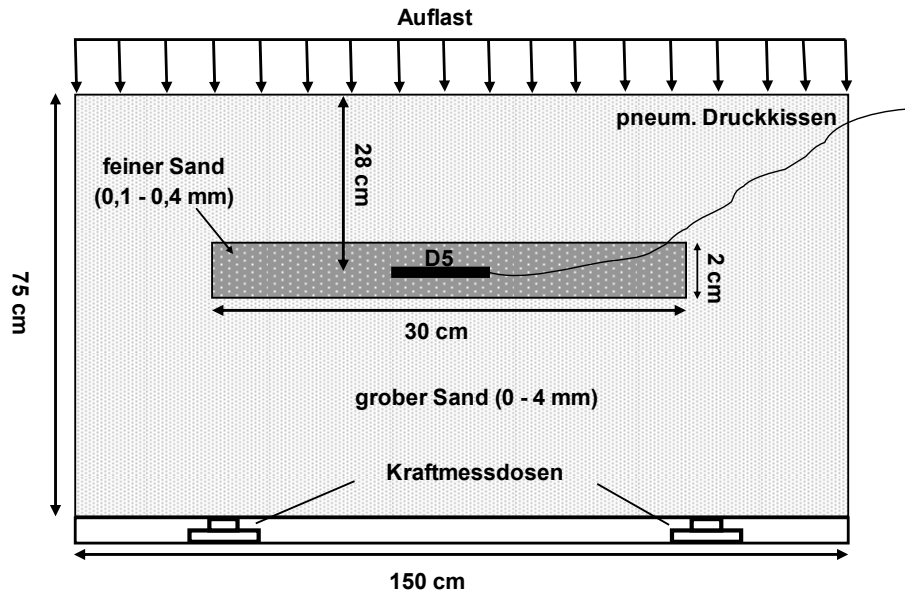


Abbildung 5.2: Schematischer Versuchsaufbau

Als Versuchsboden wurde ein grober Sand (0 – 4 mm) verwendet, die Ummantlung der Druckmessdosen erfolgte mit feinem Sand (0,1 – 0,4 mm) und Tonmehl (Wassergehalt = 32%). Der feine Sand hat einen größeren Elastizitätsmodul als der Versuchsboden, während das Tonmehl einen kleineren Elastizitätsmodul aufweist. Die bodenmechanischen Parameter sind in Kapitel 4 (Tabelle 4.2) zusammengefasst.

Zur Gewährleistung einer einheitlichen Lagerungsdichte wurde der Versuchsboden lagenweise bis zur Messinstrumentenebene eingerieselt. Die Druckmessdosen wurden auf die vorgegebene Ummantlungsschicht aufgelegt und händisch vollständig ummantelt, siehe Abbildung 5.3. Zur Verhinderung eines Vermischens des Versuchsbodens und der Ummantelung wurde unter und über die Ummantelung eine dünne PE- Folie gelegt, die die gemessene Spannung nicht beeinflusst. Im Anschluss wurde der restliche Versuchsboden eingerieselt.

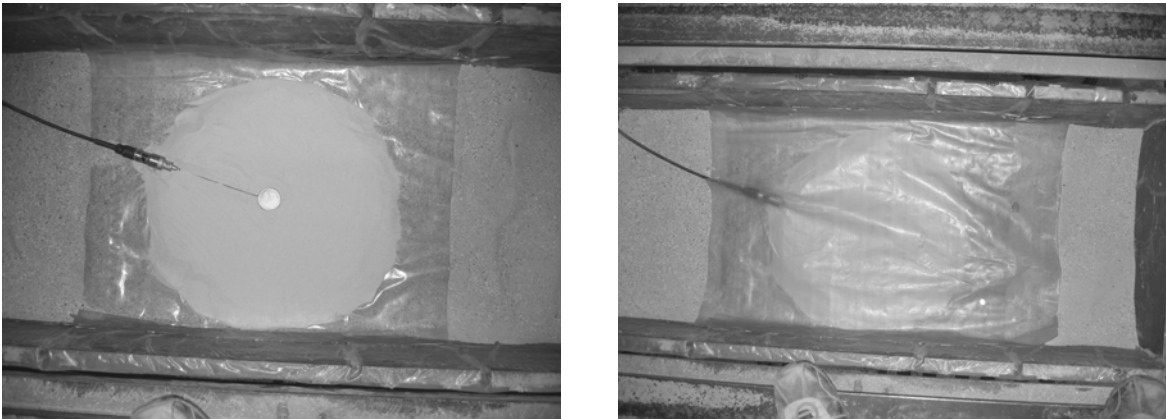


Abbildung 5.3: Auflagerung und Einbettung der Druckmessdose D5 ($D = 5$ cm)

Zur Kontrolle der Spannungsverteilung wurden fünf Druckmessdosen ohne Ummantelung diagonal in die Versuchsbox eingebaut. Die Ergebnisse des Versuches sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Die Spannungen sind nahezu konstant und entsprechen der theoretischen Spannungsverteilung. Durch die Wandreibung sind die Spannungen im Randbereich geringfügig kleiner, direkt unter den Hydraulikkissen wird eine geringfügig größere Spannung als der Mittelwert ermittelt. In der Mitte des Versuchsgerätes wird die theoretisch ermittelte Spannung gemessen.

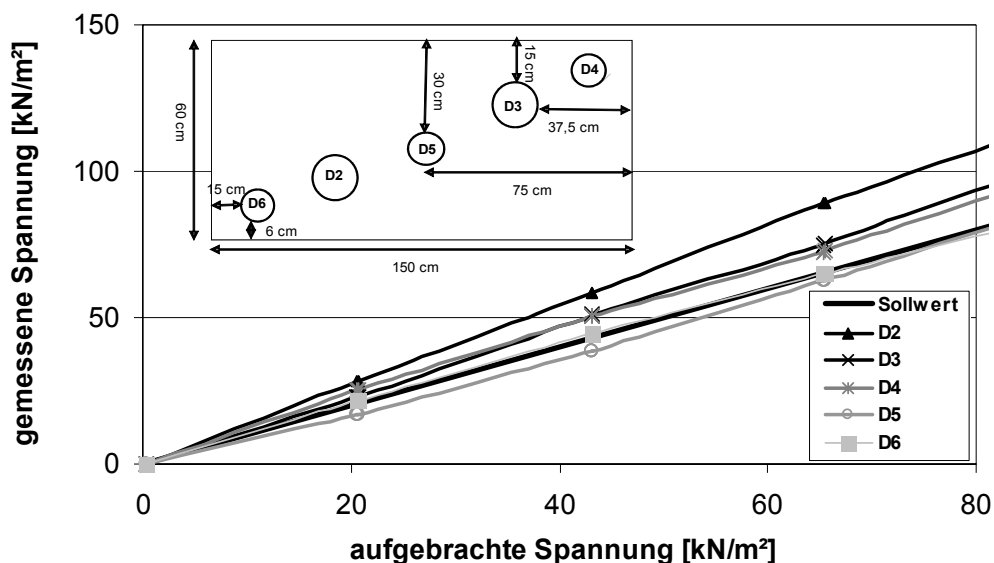


Abbildung 5.4: Spannungsverteilung in der Druckmessdosenebene in der Versuchsbox

Die Untersuchungen der nachfolgenden Ergebnisse wurden für zwei Druckmessdosen durchgeführt. Zur Ermittlung des Einflusses des Formfaktors wurden die Druckmessdosen D1 ($R_D/H_D = 13,33$) und Druckmessdose D5 ($R_D/H_D = 8,33$) verwendet.

5.2 Versuchsergebnisse

5.2.1 Einfluss der Korngröße

5.2.1.1 Druckmessdosenummantelung mit feinem Sand (0,1 – 0,4)

Zur Ermittlung des Einflusses der Korngröße wurden die Druckmessdose D1 ($D = 16$ cm) und D5 ($D = 5$ cm) mit einer 2 cm dicken Ummantelung aus Sand (0,1 – 0,2 mm) und unterschiedlichen Durchmessern eingebaut. Mit kleinerem Ummantelungsdurchmesser werden durch den Einschluss des steiferen Mediums größere Spannungen gemessen, siehe Abbildung 5.5.

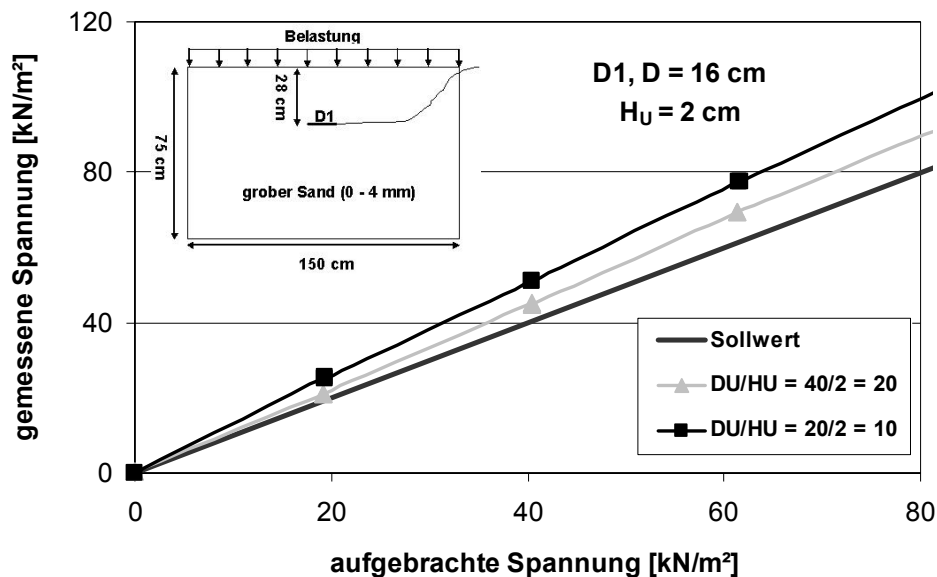


Abbildung 5.5: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, variierender Ummantelungsdurchmesser

Zur Ermittlung des Einflusses der Ummantelungsdicke wurden die Versuche mit gleichen Ummantelungsdurchmessern und größerer Ummantelungsdicke ($H_U = 4$ cm) wiederholt. Vergleichbar der Ummantelungsdicke von 2 cm werden auch hier größere als die theoretischen Spannungen ermittelt (siehe Abbildung 5.6).

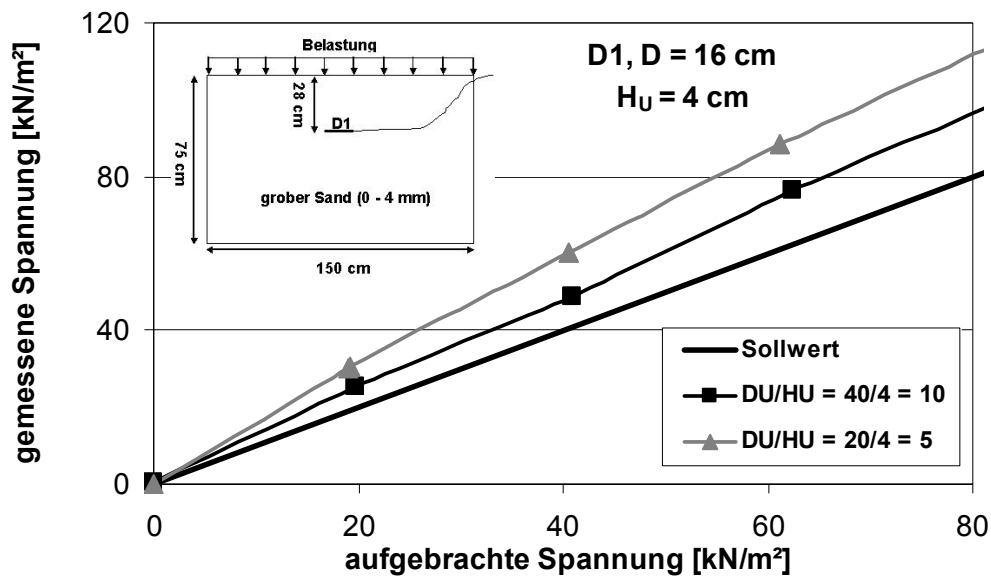


Abbildung 5.6: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, $H_U = 4$ cm, $D_U =$ variabel, $D_D = 5$ cm

Abbildung 5.7 stellt die Ergebnisse vielfältig variierten Ummantelungsdurchmesser bei konstanter Ummantelungsdicke von 2 cm dar. Vergleichbar Abbildung 5.5 ergeben sich in Abhängigkeit der Ummantelungsdicke deutliche Spannungsunterschiede.

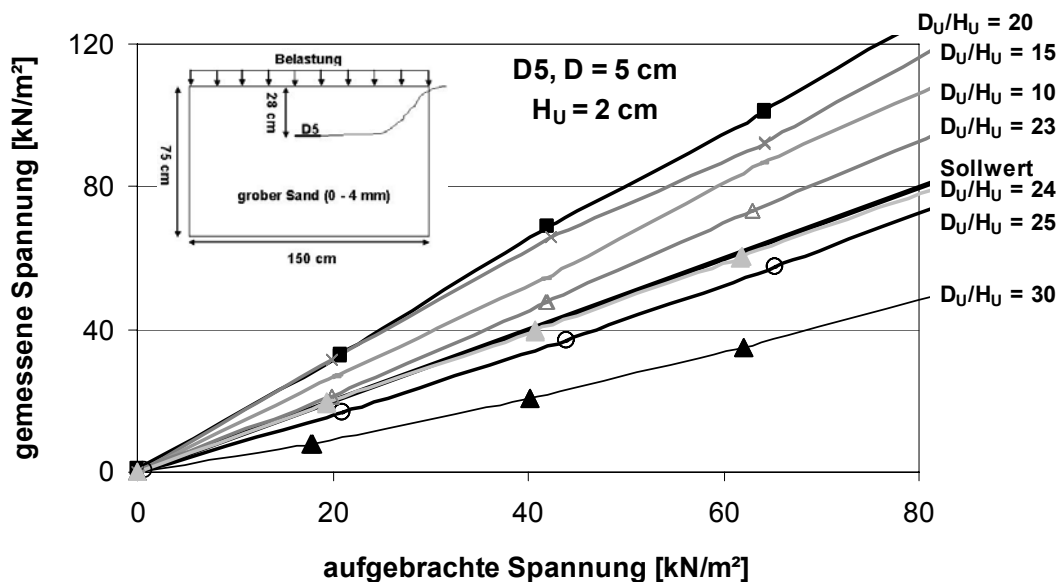


Abbildung 5.7: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, $H_U = 2$ cm, $D_U =$ variabel, $D_D = 5$ cm

Abbildung 5.8 stellt das Ergebnis der Variation der Ummantelungsdurchmesser bei konstanter Ummantelungsdicke dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich bei einem Verhältnis von $D_U/H_U = 40/2$ ein Maximalwert ergibt. Bei weiter steigendem Ummantelungsdurchmesser nehmen die gemessenen Spannungen wieder ab. Bei richtig gewähltem Verhältnis von Steifigkeit der Druckmessdose zur Ummantelung werden die prognostizierten Werte gemessen.

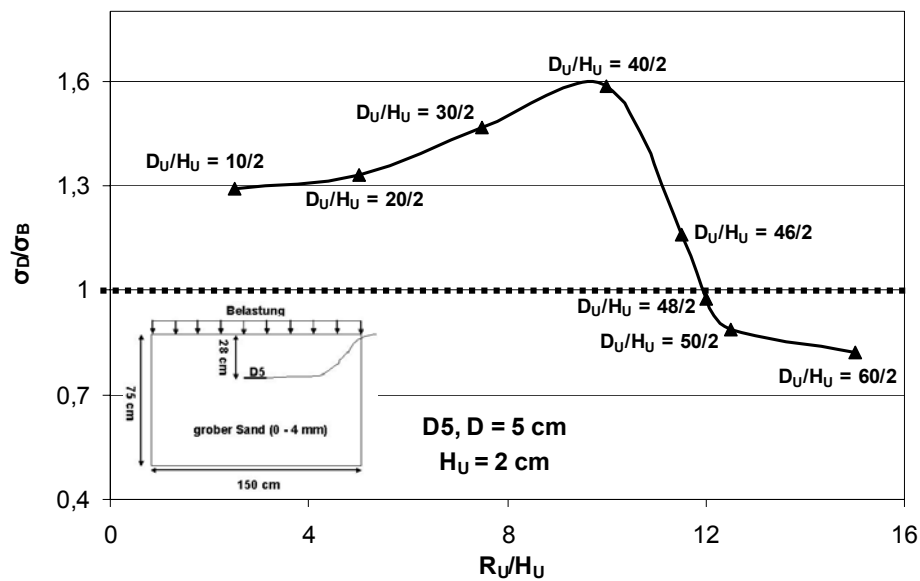


Abbildung 5.8: Änderung von σ_D/σ_B bei zunehmendem R_U/H_U , Einbettung in feinem Sand, $H_U = 2$ cm

Bei Ummantelung von D5 mit $H_U = 4$ cm und Variation des Ummantelungsdurchmesser werden tendenziell die gleichen Ergebnisse wie für D1 ermittelt (siehe Abbildung 5.9).

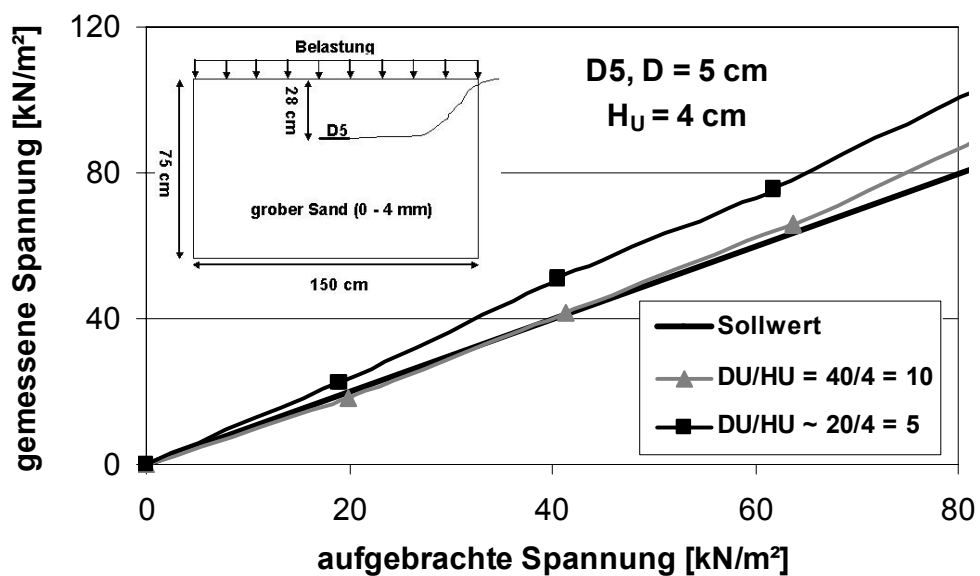


Abbildung 5.9: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, $H_U = 4$ cm, $D_D = 5$ cm

Durch den steifen Einschluss nimmt mit kleinerem D_U/H_U die gemessene Spannung zu.

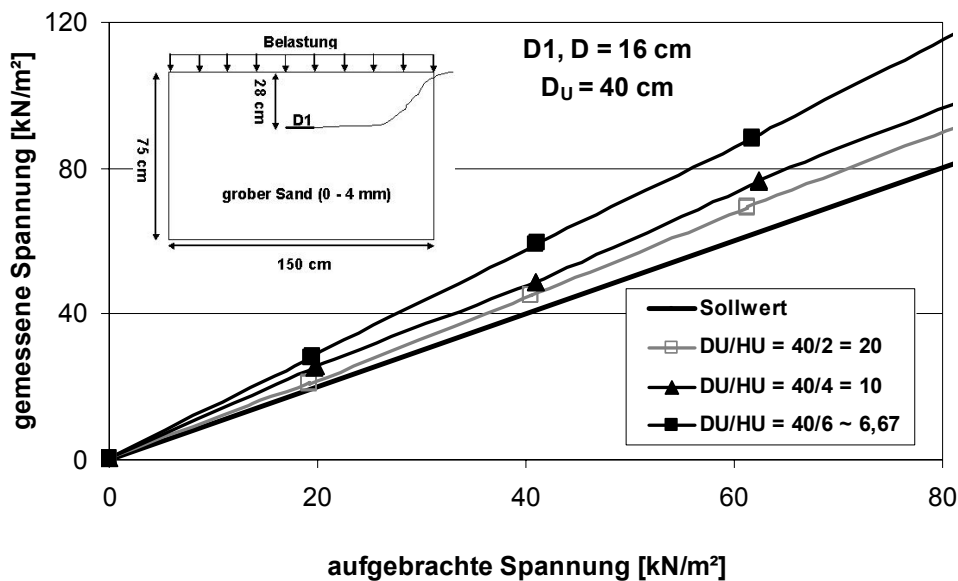


Abbildung 5.10: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, Ummantlungsdurchmesser $D_U = 40$ cm

Abbildung 5.10 stellt die Ergebnisse der Untersuchung der Druckmessdose D1 bei variierender Ummantlungsdicke und konstantem Ummantlungsdurchmesser von $D_U = 40$ cm dar. Mit abnehmendem Verhältnis von D_U/H_U ergeben sich größere ermittelte Spannungen. Vergleichbare Ergebnisse wurden für Druckmessdose D5 ermittelt (siehe Abbildung 5.11).

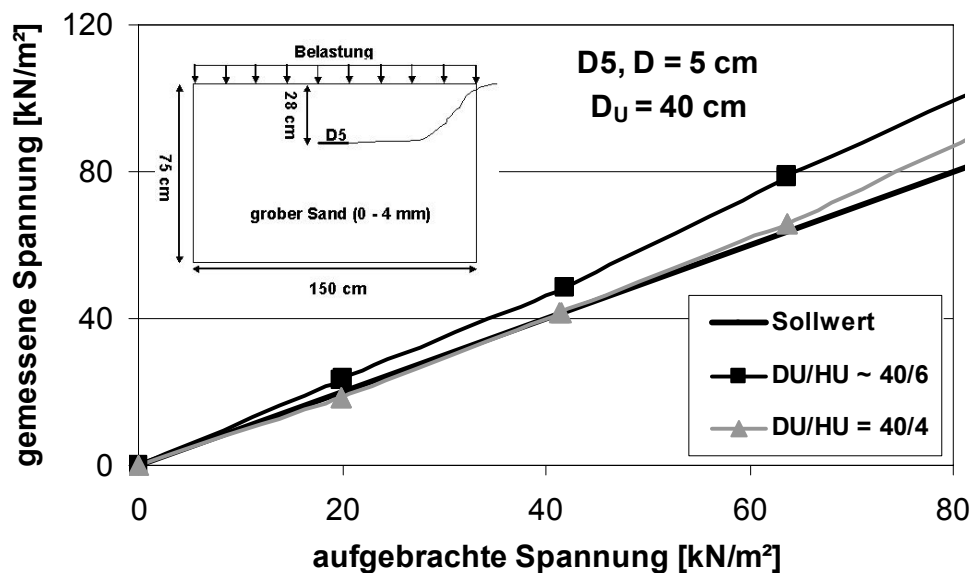


Abbildung 5.11: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, $D_U = 40$ cm, $D_D = 5$ cm

Durch die Versuche wird der Einfluss der Ummantlungsdicke und des Ummantlungsdurchmessers auf die gemessenen Spannungen deutlich. Da jedoch auch bei konstantem Verhältnis D_U/H_U die Einzelparameter variiert werden können, stellt Abbildung 5.12 die veränderten gemessenen Spannungen bei konstantem Verhältnis von $D_U/H_U = 10$

dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass für die Druckmessdose D1 nahezu konstante Spannungen durch die Druckmessdose ermittelt werden.

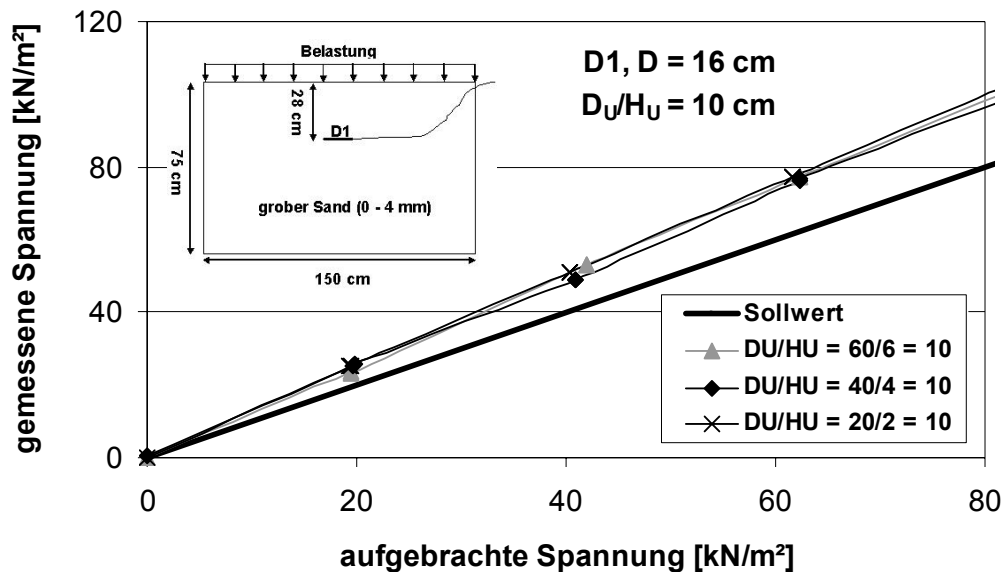


Abbildung 5.12: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, konstantes Verhältnis $D_U/H_U = 10$

Für die Druckmessdose D5 ergeben sich durch den veränderten Druckmessdosendurchmesser jedoch noch geringe Abweichungen, siehe Abbildung 5.13.

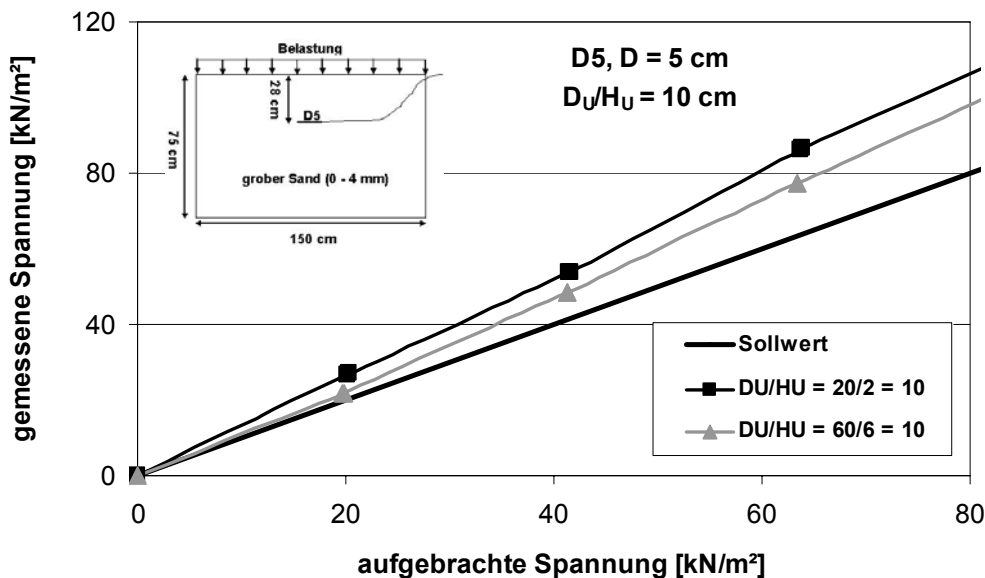


Abbildung 5.13: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, $D_U/H_U = 10$, $D_D = 5$ cm

5.2.1.2 Druckmessdosenummantelung mit Tonmehl (w = 32 %)

Wie bei der Ummantelung mit Sand wurde die Druckmessdosen mit einem Tonmehl mit einem Wassergehalt von 32% bei konstantem $H_U = 2$ cm und variierendem D_U ummantelt, siehe Abbildung 5.14 bis Abbildung 5.16. Zur Verhinderung der Einlagerung des

umgebenden Bodens in das Tonpaket wurde zwischen dem Boden und den Tonpaket ein dünnes Vlies eingelegt.

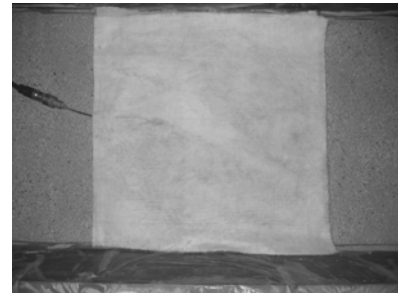
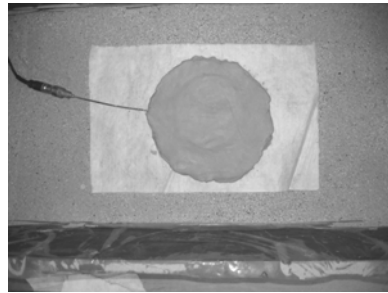
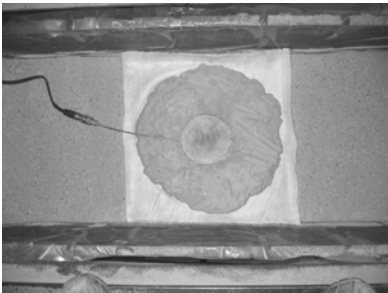


Abbildung 5.14: Auflagerung

Abbildung 5.15: Ummantelung

Abbildung 5.16: fertiger Einbau

Abbildung 5.17 stellt die Ergebnisse variierender Ummantlungsdurchmesser bei konstanter Ummantlungshöhe dar. Es ist deutlich erkennbar, dass mit zunehmendem Ummantlungsdurchmesser bzw. zunehmendem Verhältnis D_U/H_U , die gemessenen Spannungen zunehmen.

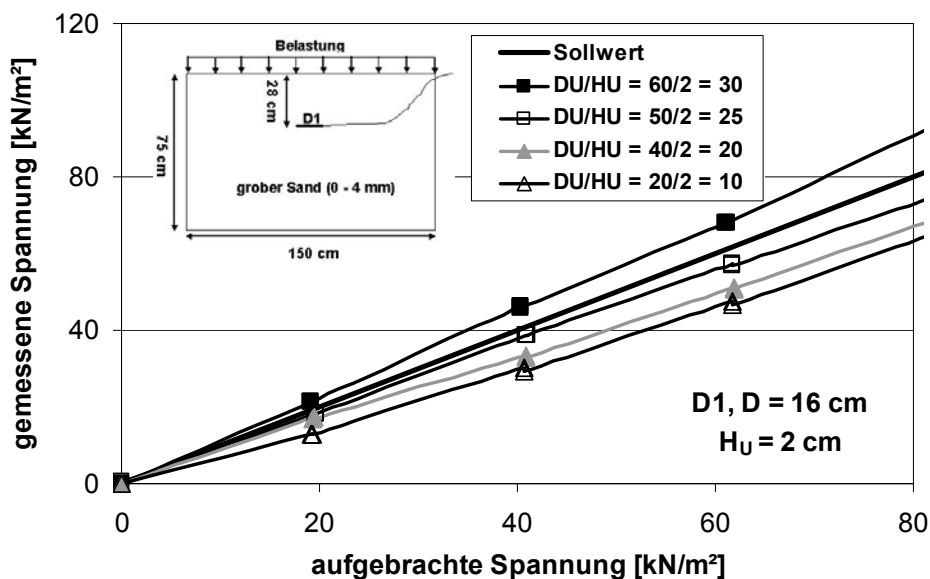


Abbildung 5.17: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, variierende Ummantlungsdurchmesser

Eine vergleichbare Zunahme der gemessenen Spannungen wurde auch bei einer konstanten Ummantlungshöhe von $H_U = 4$ cm und zunehmendem Ummantlungsdurchmesser ermittelt, siehe Abbildung 5.18.

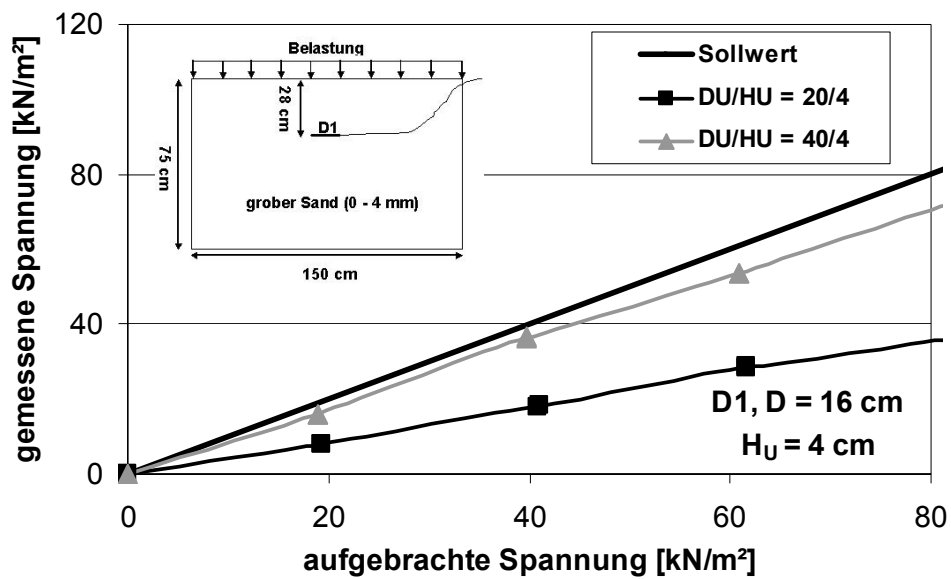


Abbildung 5.18: Gemessene vs. aufgebrachte Belastung, $H_U = 4$ cm, D_U = variabel, $D_D = 5$ cm

Zur Ermittlung des Spannungsverlaufes bei variierendem D_U wurden wie für den Sand bei konstanter Ummantelungshöhe zahlreiche Versuche durchgeführt, siehe Abbildung 5.19.

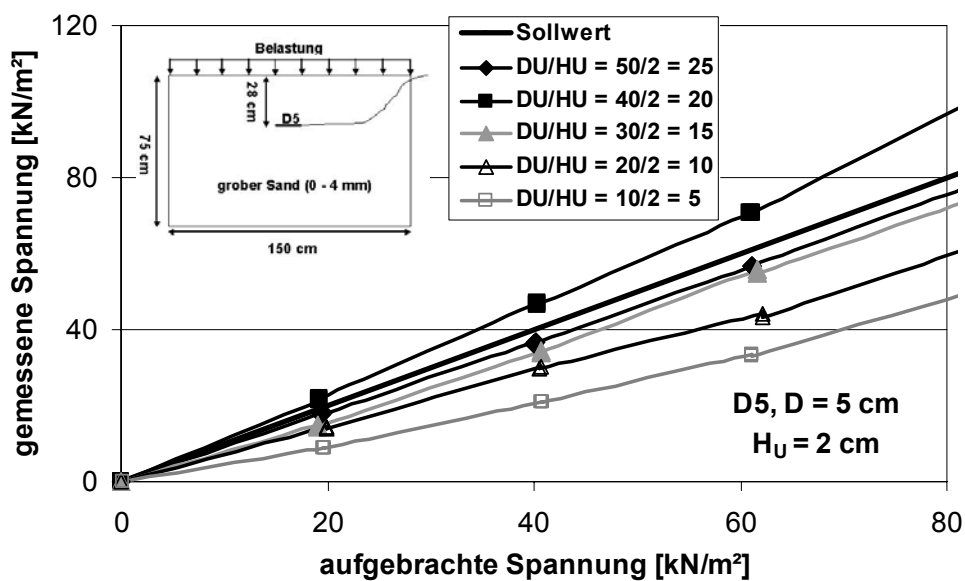


Abbildung 5.19: Gemessene vs. aufgebrachte Belastung, $H_U = 2$ cm, D_U/H_U = variabel, $D_D = 5$ cm

Abbildung 5.20 stellt die Ergebnisse wie bei den Untersuchungen im Sand in Abhängigkeit von σ_D/σ_B dar. Auch hier ergibt sich ein Maximalwert der gemessenen Spannungen.

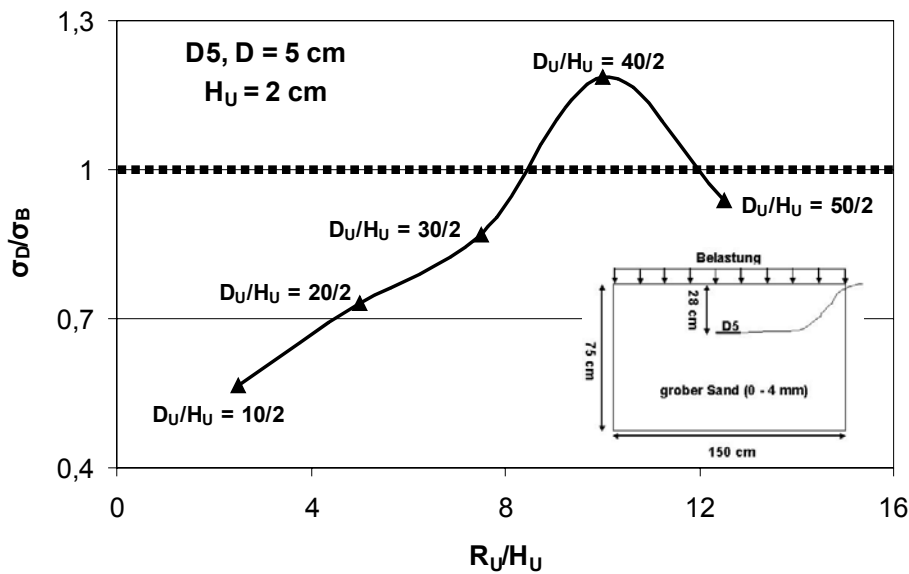


Abbildung 5.20: Änderungen von σ_D/σ_B bei konstantem $H_U=2$ cm, Tonmehl ($w=32\%$)

Wie beim Sand wurde für eine Ummantlungsdicke von 4 cm und variierendem D_U eine Zunahme der gemessenen Spannungen ermittelt, siehe Abbildung 5.21.

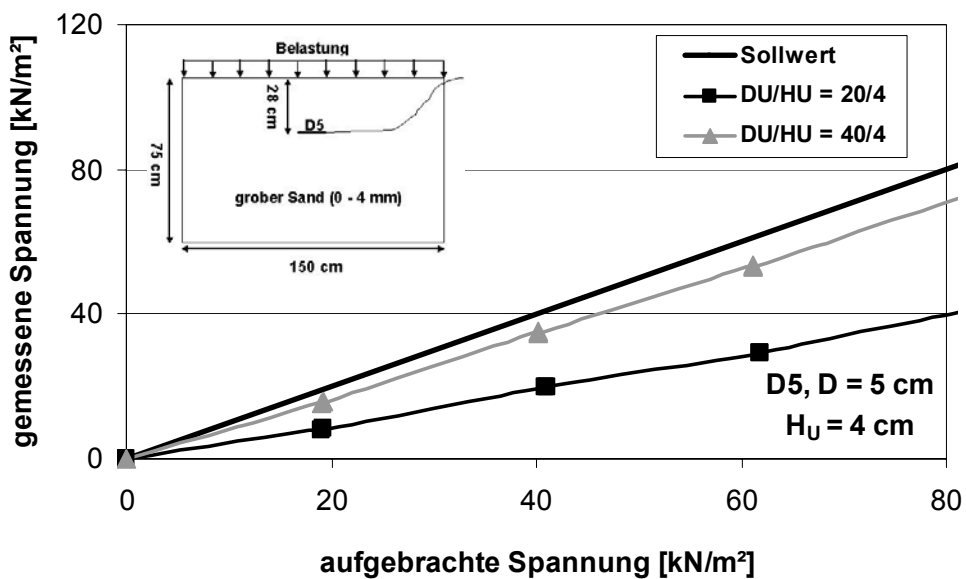


Abbildung 5.21: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, Ummantlungsdicke $H_U = 4$ cm

Bei Variation der Ummantlungsdicke wurde der Ummantlungsdurchmesser konstant gehalten. Sowohl für die Druckmessdose D1 (Abbildung 5.22) als auch D5 (Abbildung 5.23) wurde mit zunehmendem H_U eine geringere Spannung gemessen.

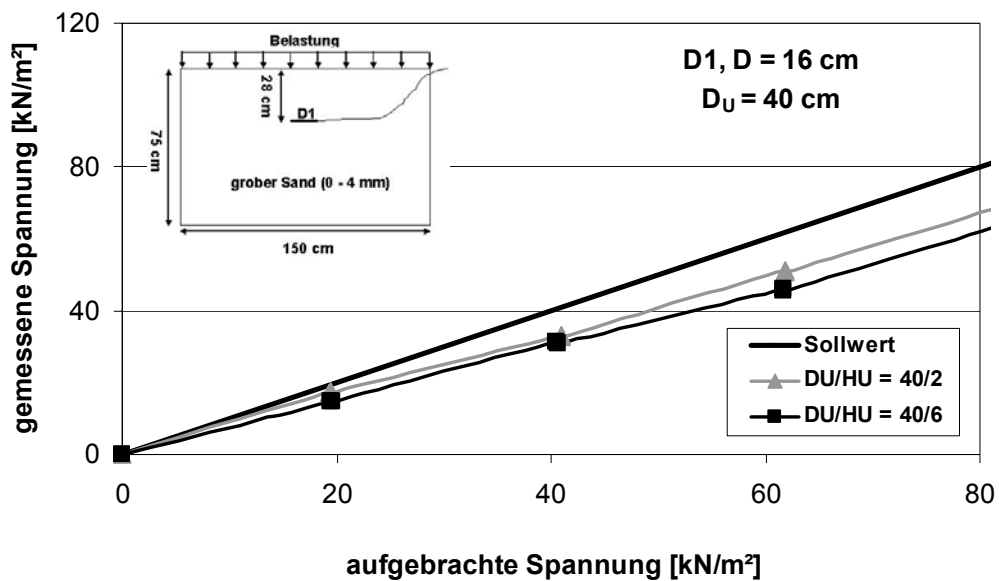


Abbildung 5.22: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, D_U = konstanter, $D_D = 16$ cm

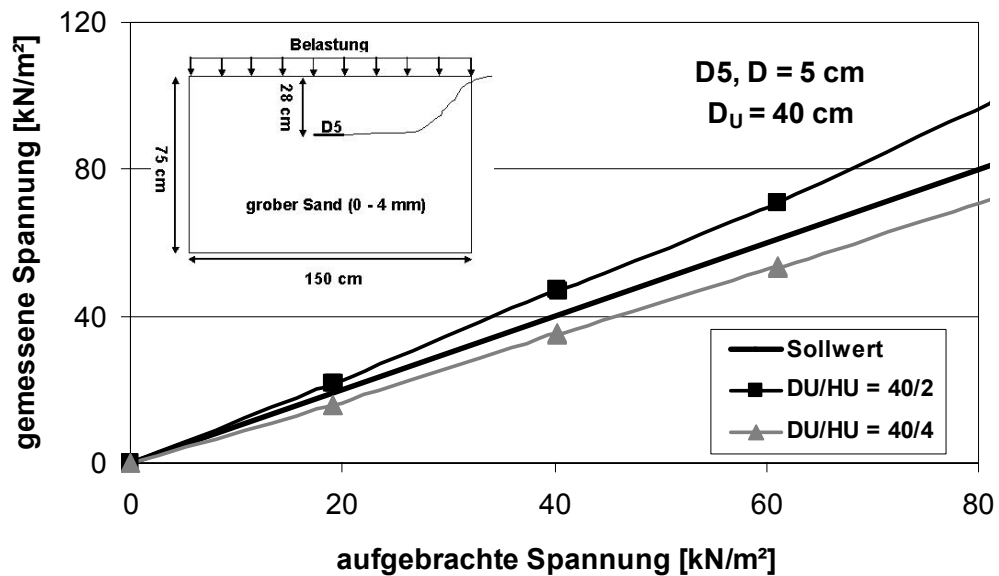


Abbildung 5.23: Gemessener vs. aufgebrachte Spannung, $D_U = 40$ cm

Zum Abschluss der Untersuchungen im Tonmehl ($w = 32\%$) wurde wie beim Sand ein konstanter Ummantelungsformfaktor von $D_U/H_U=10$ verwendet, wobei sowohl für Druckmessdose D1 (Abbildung 5.24) als auch D5 (Abbildung 5.25) eine Zunahme der gemessenen Spannungen mit zunehmendem Ummantelungsdurchmesser ermittelt wurde.

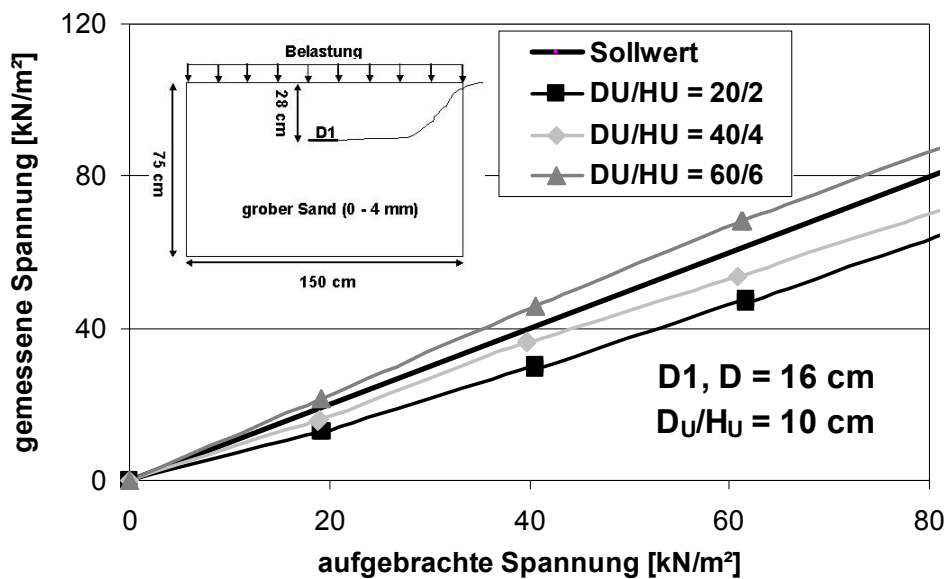


Abbildung 5.24: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, $D_U/H_U = \text{konstant}$, $D_D = 16 \text{ cm}$

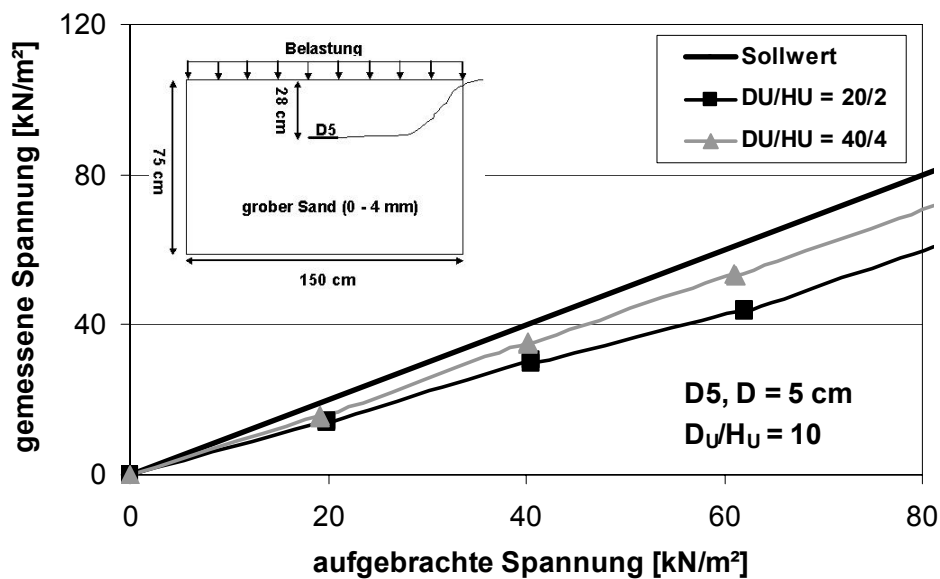


Abbildung 5.25: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, $D_U/H_U = \text{konstant}$

Mit abnehmendem Wassergehalt verändert sich die Steifigkeit des Tones. Zur Ermittlung des Einflusses der Steifigkeit wurde der Ton getrocknet. Da sich mit reduziertem Wassergehalt die Steifigkeit erhöht, werden größere Spannungen gemessen (Abbildung 5.26). Bereits nach kurzer Lagerung an der Luft werden deutliche Spannungsänderungen gemessen, durch Austrocknung ändert sich auch der Steifemodul des Bodens. Da in situ eine Kontrolle der Feuchte des Tones nicht durchgeführt werden kann, ist eine Einbettung im Ton nicht zu empfehlen.

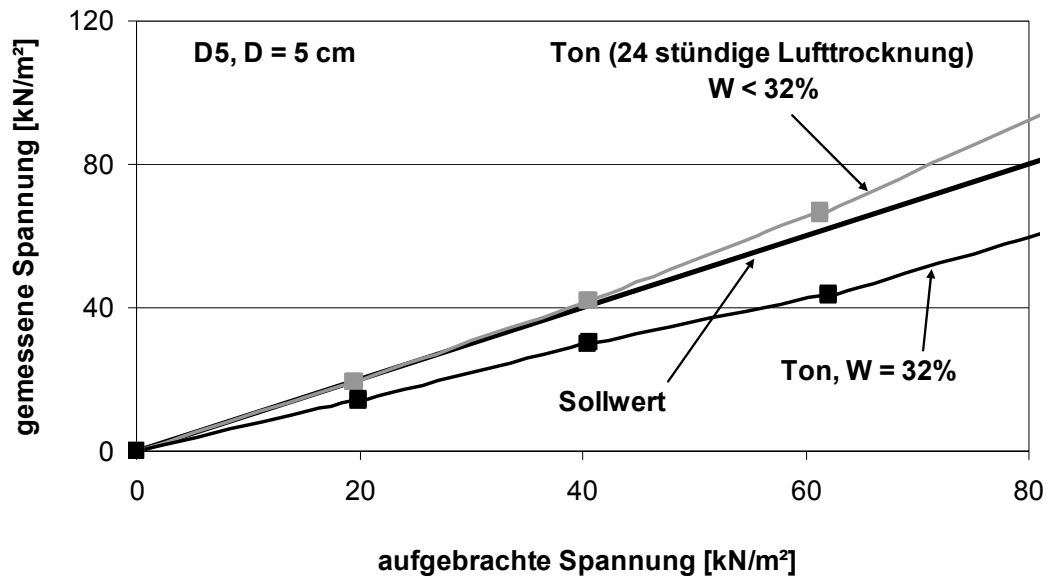


Abbildung 5.26: gemessene vs. berechnete Spannung Variation des Wassergehaltes des Tons

5.2.2 Theoretische Spannungsermittlung

Wird die Messdose mit einer Ummantelung eingebaut, ergeben sich zwei Kontaktflächen (Abbildung 5.27).

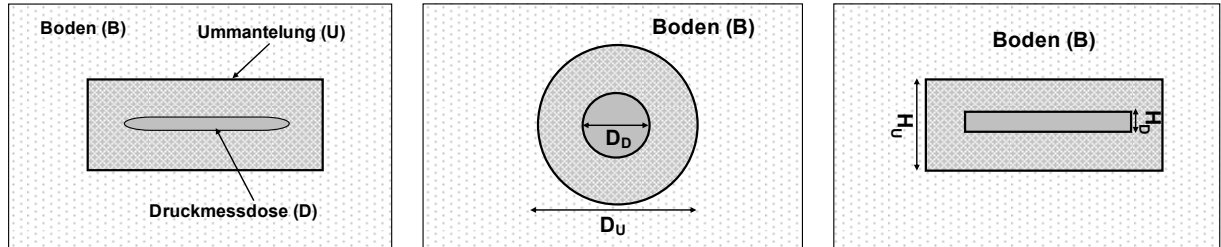


Abbildung 5.27: Schematische Darstellung, Aufsicht und Ansicht der verwendeten Parameter

Damit muss der in Gleichung 3.2 [KELLER, 1967] angegebene Parameter B (Boden) durch den Parameter U (Ummantelung) ersetzt werden (Gleichung 5.1):

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_U} = \left[1 + \frac{\frac{E_D}{E_U} - 1}{k \cdot \frac{R_D}{H_D} \frac{E_D}{E_U} + 1} \right] \quad 5.1$$

Zur Ermittlung der zweiten Kontaktfläche wird der Parameter D (Druckmessdose) durch den Parameter U (Ummantelung) ersetzt (Gleichung 5.2):

$$\frac{\sigma_U}{\sigma_B} = \left[1 + \frac{\frac{E_U}{E_B} - 1}{k \cdot \frac{R_U}{H_U} \frac{E_U}{E_B} + 1} \right] \quad 5.2$$

Da die Spannungen in der Druckmessdose und dem umgebenden Boden gleich sein müssen ($\sigma_D/\sigma_B=1$), können die entstehenden Gleichungen multipliziert werden (Gleichung 5.3):

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_B} = \left[1 + \frac{\frac{E_U}{E_B} - 1}{k \cdot \frac{R_U}{H_U} \frac{E_U}{E_B} + 1} \right] \left[1 + \frac{\frac{E_D}{E_U} - 1}{k \frac{R_D}{H_D} \frac{E_D}{E_U} + 1} \right] \quad 5.3$$

Die sich aus den Versuchen ergebenden Differenzen, werden durch einen zusätzlichen Korrekturfaktor ausgeglichen (Gleichung 5.4):

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_B} = \left[1 + \frac{\frac{E_U}{E_B} - 1}{k \cdot \frac{R_U}{H_U} \frac{E_U}{E_B} + 1} \right] \left[1 + \frac{\frac{E_D}{E_U} - 1}{k \frac{R_D}{H_D} \frac{E_D}{E_U} + 1} \right] \left[1 \pm \frac{2R_D + 1}{R_D \times R_U} \right] \quad 5.4$$

mit: R_U = Radius des Kreiszylinders aus dem Ummantlungsmaterial
 H_U = Höhe des Kreiszylinders aus dem Ummantlungsmaterial
 E_U = Elastizitätsmodul des Materials der Ummantlung
 σ_U = die über die Ummantlungskreisfläche gemittelte Normalspannung
 R_D = Radius des Kreiszylinders
 H_D = Höhe des Kreiszylinders
 Vorzeichenregelung:
 + wenn $E_U > E_B$, - wenn $E_U < E_B$

5.2.2.1 Berechnete vs. gemessene Spannungen (Sand, 1 – 4 mm)

Abbildung 5.28 stellt die theoretisch ermittelten Spannungen dar. Zusätzlich sind in Abbildung 5.29 die prognostizierten und die gemessenen Spannungen für die Druckmessdose D1 mit $D_D = 16$ cm und Verhältnis von $D_D/H_D = 13,33$ in Sand und Ton dargestellt. Zwischen prognostizierten und berechneten Spannungen ergeben sich nur geringe Abweichungen für realitätsnahe Verhältnisse R_U/H_U von 4 bis 12.

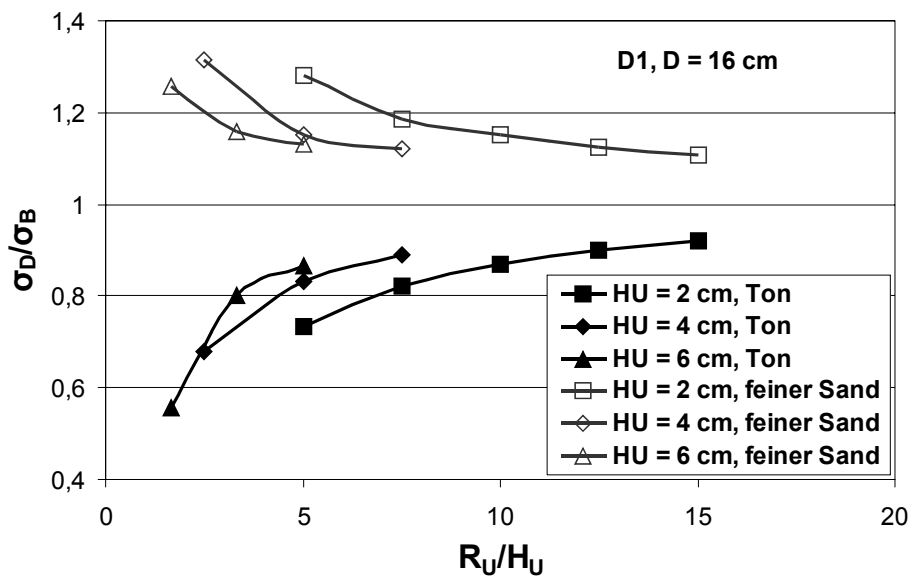


Abbildung 5.28: Rechnerische Spannung bei variierendem R_U/H_U , $D_D = 16$ cm

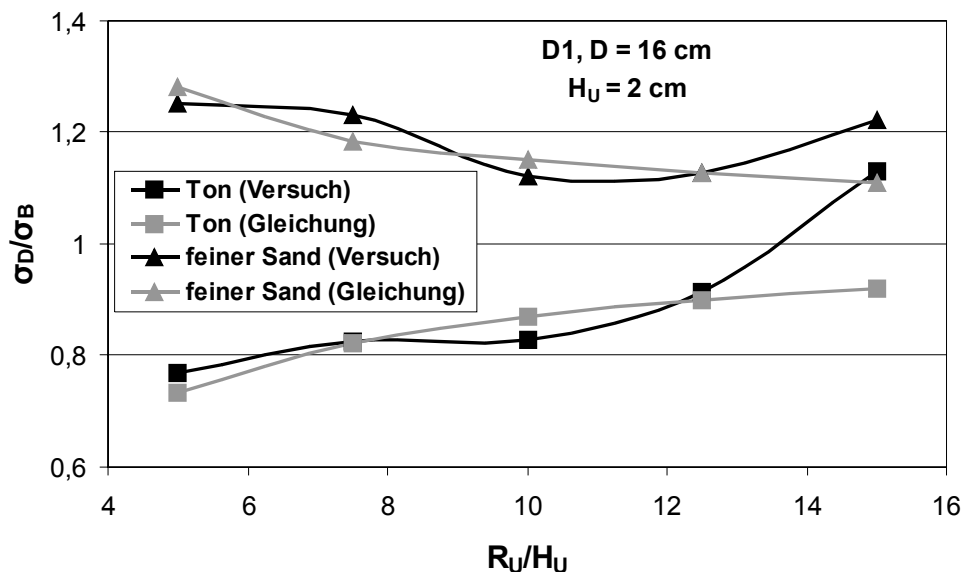


Abbildung 5.29: Vergleich von Berechnung und Prognose, Druckmessdose D1, $H_U = 2$ cm

Auch bei der kleineren Druckmessdose D5 passen die Ergebnisse der berechneten und der ermittelten Spannungen trotz der geringfügig größeren Abweichungen gut überein. Abweichungen werden nur für die ermittelten Maximalwerte (Abbildung 5.30) festgestellt. Aufgrund der ansonsten guten Annäherung der berechneten und der gemessenen Spannungen wird davon ausgegangen, dass die Abweichungen durch die Abmessungen der Versuchsbox entstehen, die bei großen Ummantelungsdurchmessern zu Spannungsbeeinflussungen im Randbereich führen. Die ermittelten Abweichungen wurden nur für die Druckmessdose D5 ermittelt. Die Ergebnisse im Ton und Sand der Druckmessdose D5 sind in Abbildung 5.31 dargestellt.

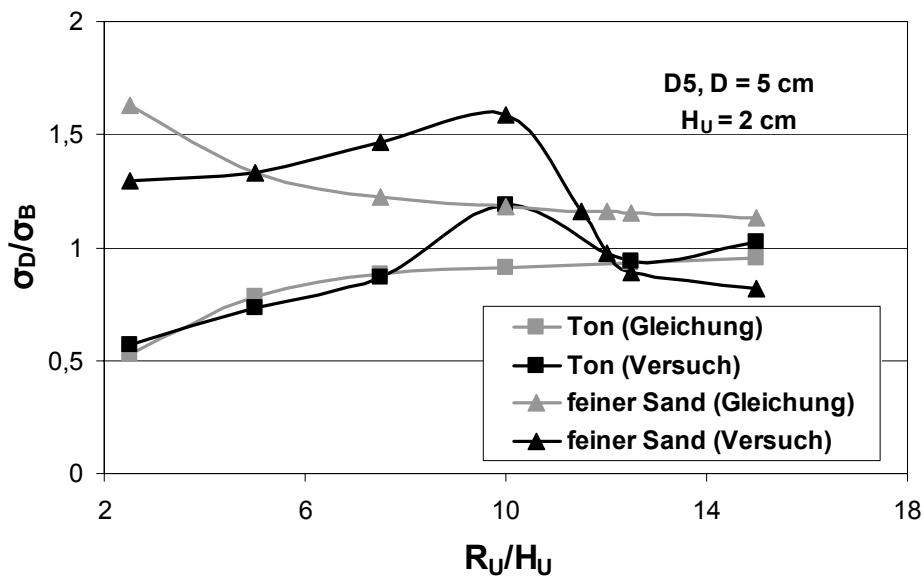


Abbildung 5.30: Vergleich von Berechnung und Prognose, Druckmessdose D5, $H_U = 2$ cm

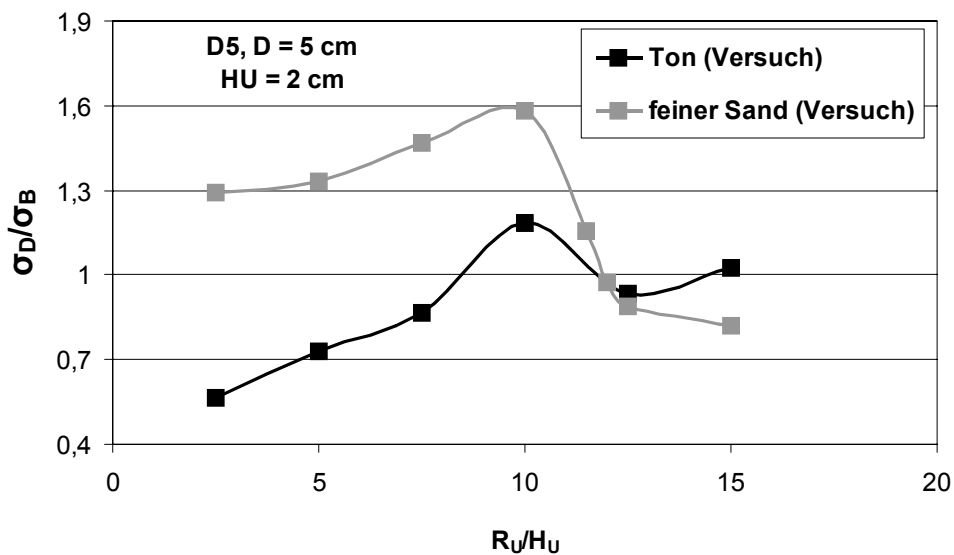


Abbildung 5.31: Ermittelte Spannung bei variierendem R_U/H_U , $D_D = 5$ cm

Aufgrund der Geräteabmessungen konnte nicht untersucht werden, ob der sich ergebende Maximalwert auch für die Druckmessdose D1 besteht. Unterstellt man die gleichen Verhältnisse von $D_U/H_U = 40/2 = 8$ bzw. $R_U/H_U = 10/2 = 5$ der Druckmessdose D5 auch der Druckmessdose D1 ergeben sich deutlich größere Abmessungen der erforderlichen Versuchsbox.

5.2.2.2 Berechnete vs. gemessene Spannungen (Kies, 2 – 12 mm)

Zusätzlich wurden Untersuchungen in einem Boden mit einem Elastizitätsmodul (60 bis 70 MN/m²) ausgeführt. Als Ummantelung wurde wiederum der feine Sand verwendet. Die

Ergebnisse der Versuche zeigen gute Anpassung zwischen den theoretisch ermittelten und den gemessenen Spannungen (Abbildung 5.32).

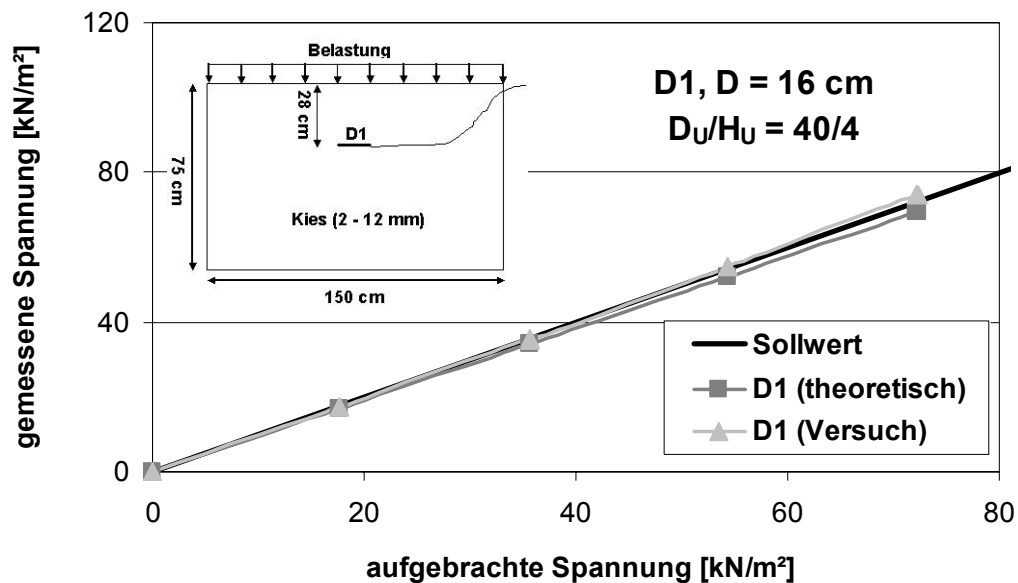


Abbildung 5.32: Gemessene vs. aufgebrachte Spannung, Kies 2-12, Einbettung in feinem Sand

Die Ergebnisse sind nahezu unabhängig von dem Ummantelungsdurchmesser, wie in Abbildung 5.33 dargestellt ist.

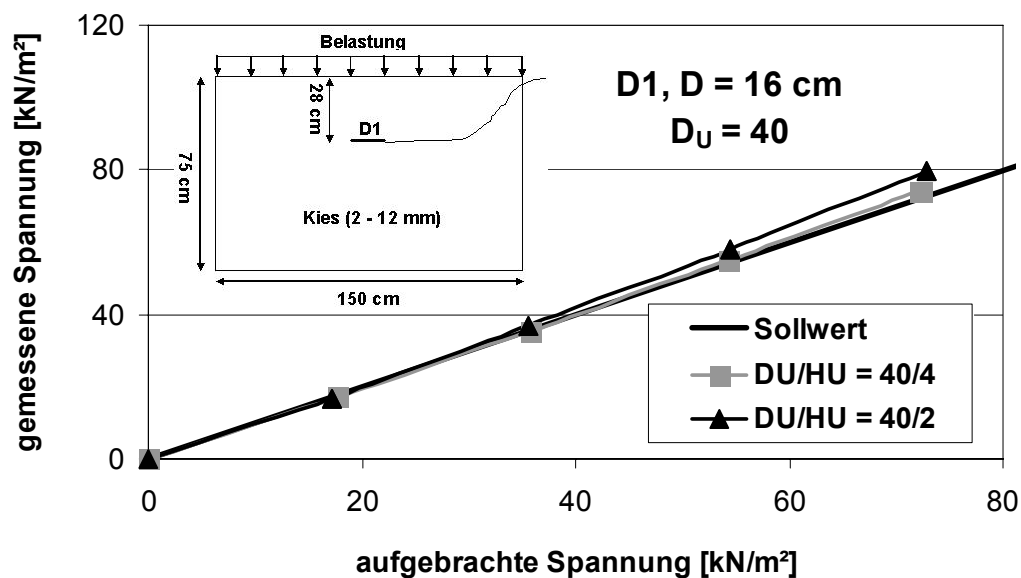


Abbildung 5.33: Gemessene vs. aufgebrachte Belastung, $D_U = 40$ cm, Kies, Einbettung in feinem Sand

5.2.3 Großversuch mit Kies 0 – 36 mm

Als zusätzliche Versuchsreihe zur Kontrolle der theoretischen Gleichung wurden zwei quadratische Druckmessdosen mit Abmessungen von 40 x 40 cm in eine Versuchsbox mit Abmessung von 2 x 2 x 2 m eingebaut. Als Ummantelung wurde Sand mit einem H_U von 3

cm und D_{50} von 46 cm verwendet. Der umgebenden Boden bestand aus Schotter mit einer Korngröße von 0 bis 36 mm, einer Dichte von 19 kN/m^3 und einem Elastizitätsmodul von ca. 100 kN/m^2 . Eine schematische Darstellung von Versuchseinbau stellt Abbildung 5.34 dar.

Der Kies wurde in mehreren Lagen in der Versuchsbox eingebaut und lagenweise verdichtet. Zuerst wurde Druckmessdose 1 eingebaut und bis 40 cm überschüttet. Auf diese Ebene wurde Druckmessdose 2 eingebaut und 70 cm überschüttet (siehe Abbildung 5.34). Als aufgebrachte Spannung wurde die Auflast aus dem Boden ($\gamma \times h$) auf die Druckmessdosen angenommen.

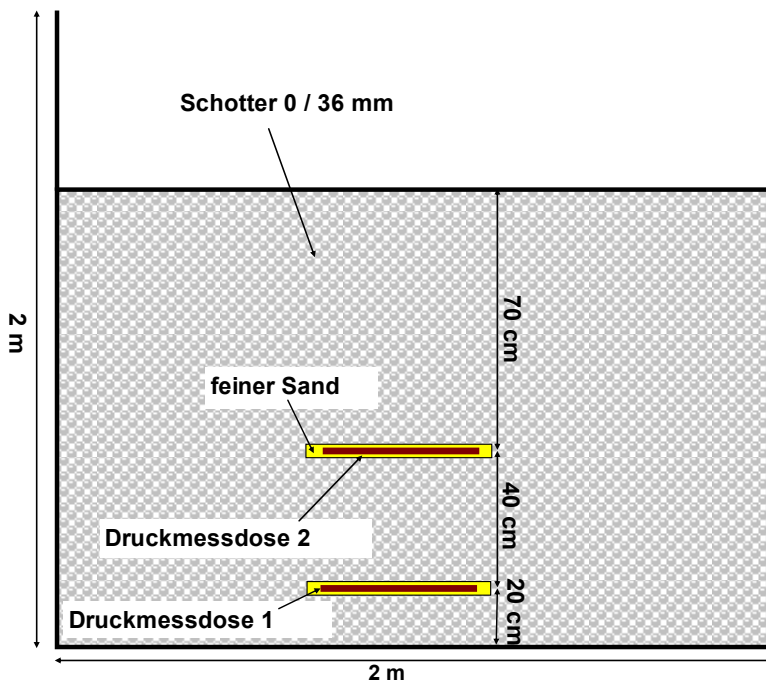


Abbildung 5.34: Schematische Darstellung des Versuchseinbaus

Die gemessenen Spannungen (Abbildung 5.35) zeigen in beiden Druckmessdosen erhebliche Abweichungen der theoretisch ermittelten Spannungen mit den gemessenen. Durch Berechnung der Spannungen kann eine deutliche Verbesserung der Abweichungen zum theoretischen Sollwert erreicht werden, siehe Tabelle 5.1. Generell sollte jedoch ein größerer vertikaler Abstand der Druckmessdosen untereinander belassen werden.

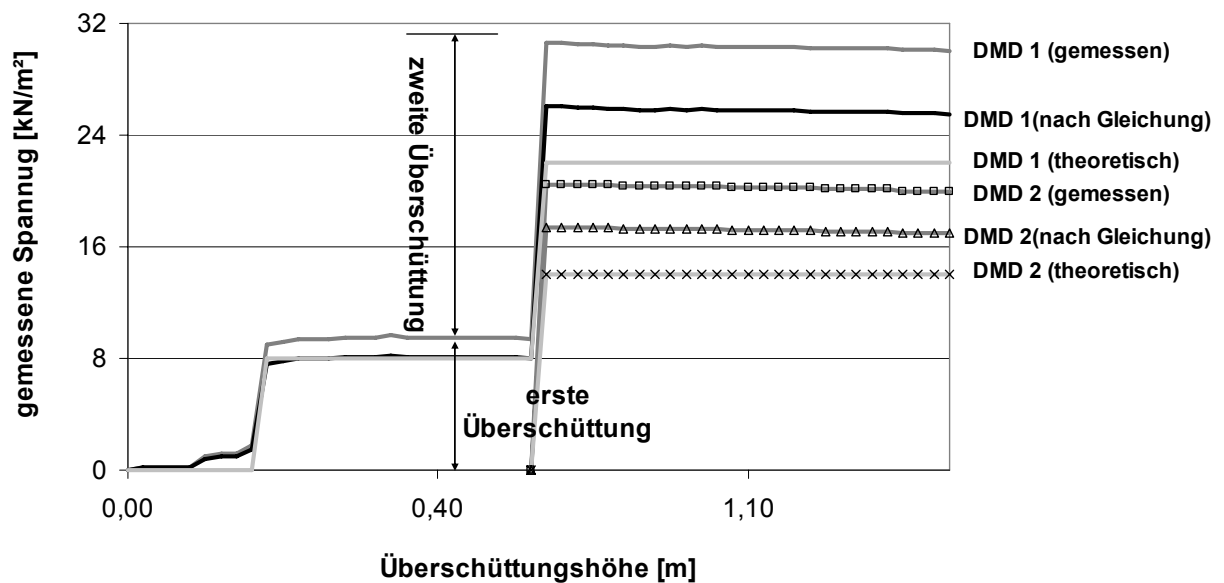


Abbildung 5.35: Vergleich der gemessenen Spannungen und berechneten Ergebnisse

Tabelle 5.1: Vergleich gemessener und berechneter Spannungen

	Überschüttung	Wert	Spannung [kN/m²]	Abweichung[%]
Druckmessdose 1	0,40 m	Sollwert	8	-
		gemessen	9,5	18,7
		korrigiert	8	0
	1,10 m	Sollwert	24	-
		gemessen	29,6	23,3
		korrigiert	25,1	4,6
Druckmessdose 2	0,7 m	Sollwert	14	-
		gemessen	19,3	38
		korrigiert	16,4	17

5.3 Feldversuch

Zur Verifizierung der Anwendbarkeit der Laborergebnisse in situ wurden vier Druckmessdosen mit einem Durchmesser von 23 cm in einem Projekt in Bremerhaven eingebaut. Zum Lastabtrag in ausreichend tragfähige Schichten wurden, wie in Abbildung 5.36 schematisch dargestellt, Pfähle in den gering tragfähigen Boden eingebracht. Zur Reduzierung der Vertikalspannung auf den gering tragfähigen Boden zwischen den Pfählen wurde eine zweilagige Geokunststoffbewehrung über den in einem Dreieckraster angeordneten Pfählen eingelegt. Durch die Membran- und Bewehrungswirkung werden die Vertikallasten in die Pfähle eingeleitet.

Theoretisch ergeben sich durch Gewölbewirkungen in der Dammschüttung größere Spannungen über den Pfählen, bei gleichzeitiger Reduzierung der Vertikalspannung zwischen den Pfählen. Zur Ermittlung der wirkenden Belastung auf die Pfähle und den gering

tragfähigen Untergrund wurden die Druckmessdosen in verschiedenen Tiefenlagen über einem Pfahl und dem zwischenliegenden Bereich angeordnet.

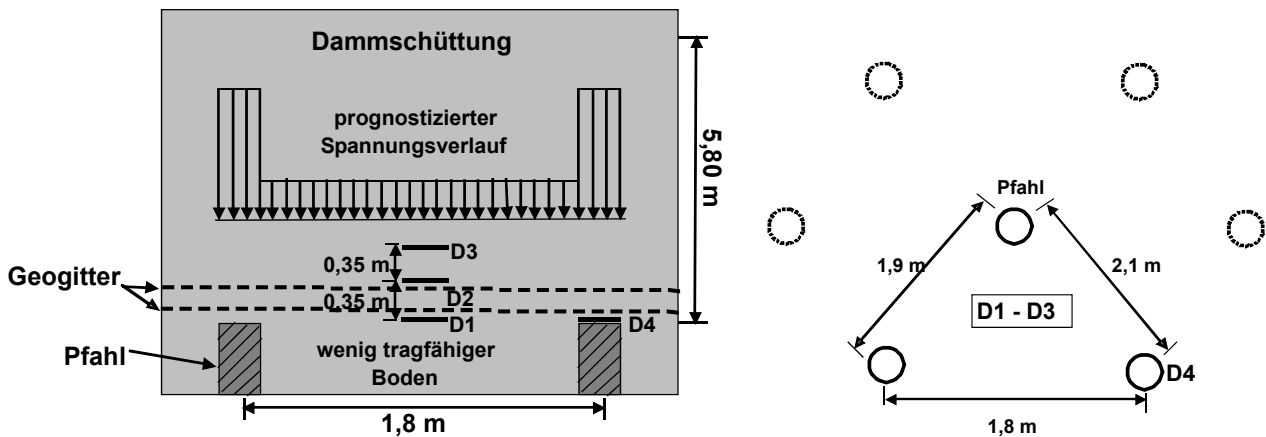


Abbildung 5.36: Schematische Darstellung der Spannungsausbildung, Grundriss des Messbereiches

Die Druckmessdose D4 ist ca. 10 cm über dem Pfahlkopf angeordnet. Die Druckmessdose D1 ist auf gleicher Höhe zwischen den Pfählen, die Druckmessdosen D2 und D3 sind in einem vertikalen Abstand von ca. 35 und 70 cm über der Druckmessdose D1 angeordnet. Die Druckmessdosen wurden mit einer Schicht Feinsand 0,1 – 0,4 mm in einem Durchmesser von $D_U = 60$ und $H_U = 2$ cm eingebaut, siehe Abbildung 6.37.



Abbildung 5.37: Bettung der Druckmessdose D2

Die Dammschüttung wurde mit einer Dichte von 17 kN/m^3 und einer Höhe von 5,80 m erstellt. Ohne Gewölbebildung im Untergrund ist in den Druckmessdosen eine Spannung von ca. $98,6 \text{ kN/m}^2$ zu erwarten. Durch die Gewölbewirkung konnte mit den Druckmessdosen über den Pfählen eine Spannung von 235 kN/m^2 , zwischen den Pfählen jedoch eine deutlich geringere Spannung von ca. 40 kN/m^2 ermittelt werden, und die Anwendbarkeit der Bauweise nachgewiesen werden. Die Entwicklung der Spannungen mit zunehmendem Bauablauf zeigt Abbildung 5.38.

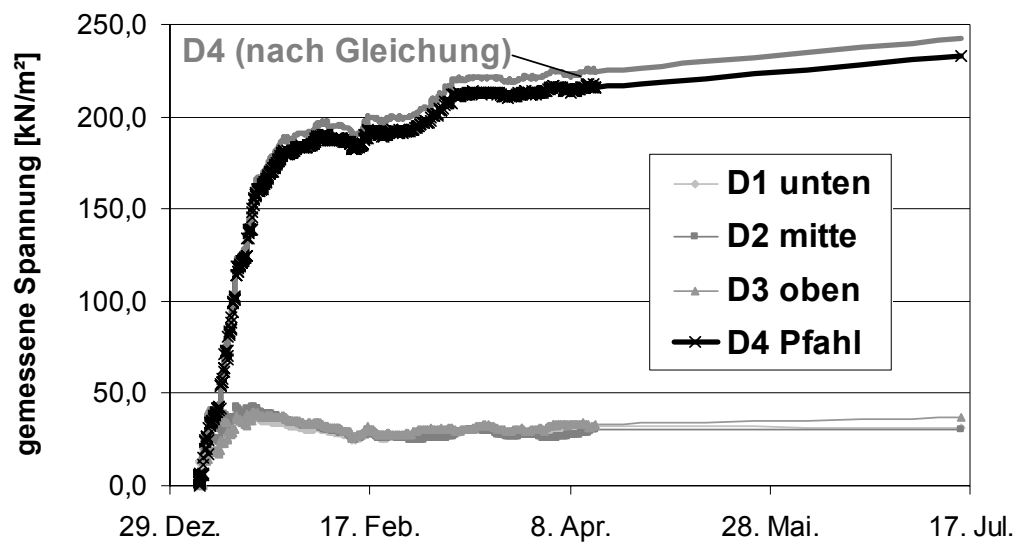


Abbildung 5.38: Spannungsentwicklung während der Dammschüttung

Durch die Druckmessdosen konnte die theoretisch prognostizierte Spannungsverteilung innerhalb des Tragsystems nachgewiesen werden.

6 Beeinflussung der Messergebnisse geotechnischer Messinstrumente durch den Betonabbindeprozess

6.1 Verwendete Messinstrumente

Zur Ermittlung des Einflusses des Abbindeprozesses auf die Messergebnisse geotechnischer Messinstrumente wurden zylindrische Betonkörper erstellt, die mit Dehnmessgebern, Betondruckmessdosen und Thermistoren instrumentiert wurden. Die Datenerfassung erfolgte unmittelbar nach Betonieren der Versuchskörper, sodass die Spannungs- und Temperaturentwicklung während des gesamten Abbindeprozesses ermittelt werden konnten.

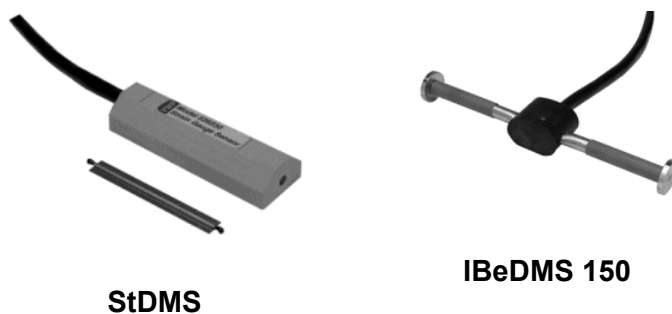
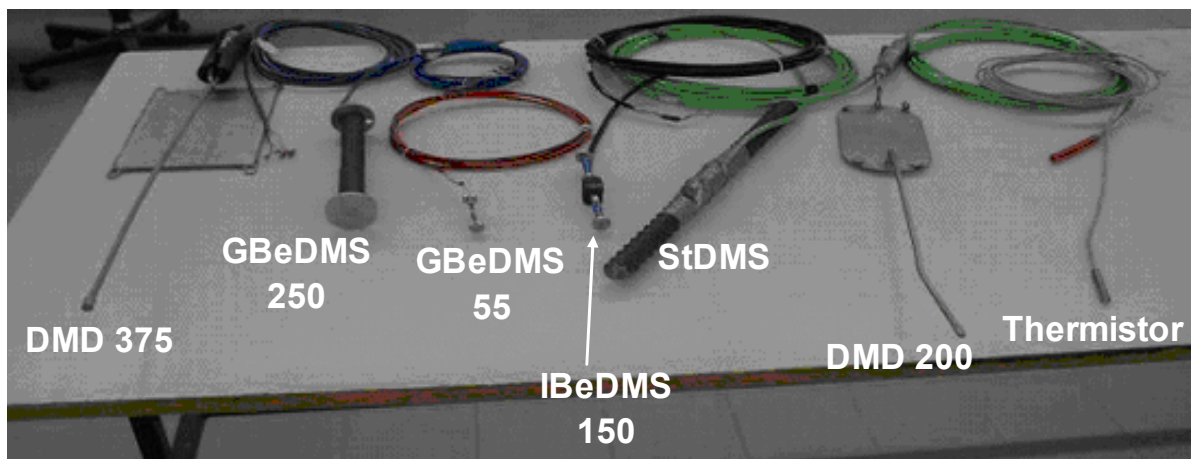


Abbildung 6.1: Verwendete Messinstrumente

Es wurden Messinstrumente unterschiedlicher Eigensteifigkeit und Größe von verschiedenen Herstellern (Geokon, Interfels) verwendet. Die verwendeten Messinstrumente sind in Abbildung 6.1 dargestellt und zusätzlich in Tabelle 6.1 spezifiziert.

Tabelle 6.1: Spezifikationen der verwendeten Sensoren

Typ	Modell Hersteller	Messbereich	Genauigkeit	Größe Fläche/ Länge	Bezeichnung	Messeinsatz
Druckmessdose	4850-2 Geokon	2 Mpa	0,1%	375 cm ²	DMD 375	Radialspannungen in Tunnelschalen
Betondehnungsgeber	VCE-4200 Geokon	3.000 µε	1 µε	155 mm	GBeDMS 155	Betondehnung
Betondehnungsgeber	VCE-4202 Geokon	3.000 µε	0,4 µε	55 mm	GBeDMS 55	Betondehnung im Labor, kleines Zuschlagkorn
Betondehnungsgeber	VCE-4210 Geokon	3.000 µε	0,4 µε	260 mm	GBeDMS 250	Betondehnung in Massenbeton mit groben Zuschlag
Betondehnungsgeber	52640126 Interfels	3.000 µε	1 µε	153 mm	IBeDMS 150	Betondehnung, in Pfählen und Stützwände
Stahldehnungsgeber	132.0500 Interfels	2.500 µε		400 mm	StDMS	Stahldehnung
Betondruckmessdose	331.6510 Interfels	0,7 Mpa	0,25%	200 [cm ²]	DMD 200	Tangential- und Radialspannung in Tunnelschalen. Mit Nachspannrohr
Thermistor	3800 Geokon	-		-	Thermistor	Temperaturmessung

6.2 Versuchsprogramm

Für die Ermittlung der Einflussfaktoren wurden insgesamt 18 Betonkörper erstellt. Die zylindrischen Betonkörper der Regelversuche haben ein Durchmesser von 50 cm und eine Höhe von 48 cm. Es ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Die Abmessungen der Versuchskörper mit veränderten Durchmessern und Bauhöhen sind in Anhang C Tabelle C.1 und C.2 zusammengestellt.

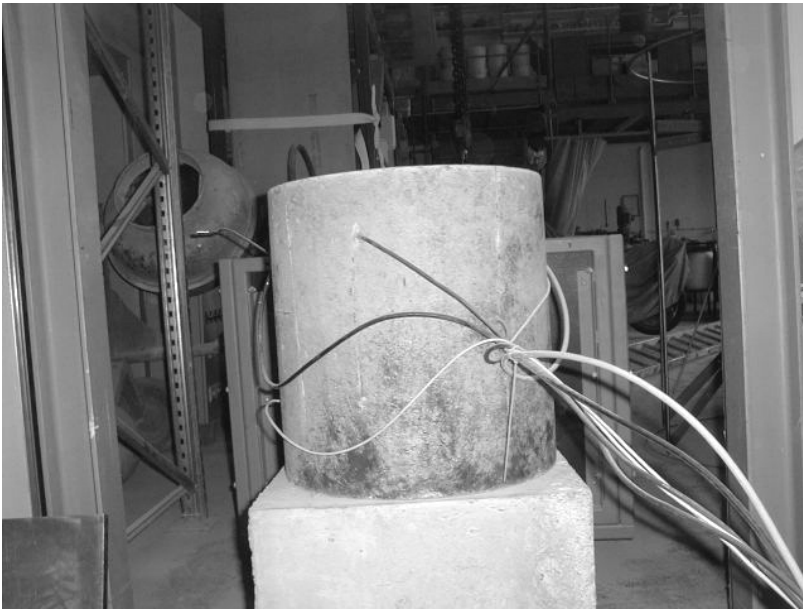


Abbildung 6.2: Betonkörper 1

Die Lage der Sensoren wurde zum Vergleich der Messergebnisse annähernd identisch gewählt. Die Druckmessdose wurde jeweils in der Mitte des Betonkörpers angeordnet, die Dehnungsmessgeber wurden ca. 5 cm von der Schalung entfernt im Beton eingebettet. Der exemplarische Querschnitt durch einen Versuchskörper ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

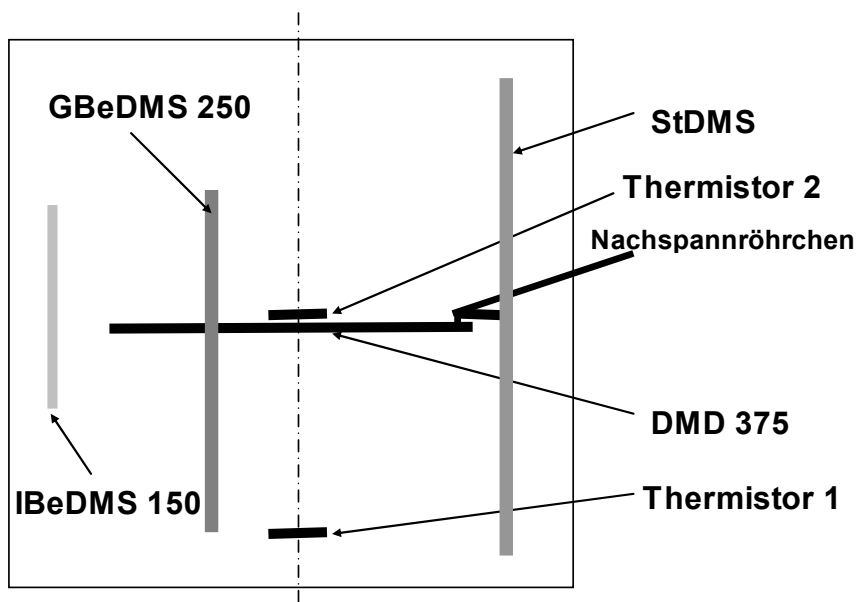


Abbildung 6.3: Querschnitt durch einen Versuchskörper

Zur Lagesicherung und zur Bestimmung der exakten Position der Messinstrumente innerhalb des Versuchskörpers wurden die Messinstrumente an einer Stahlkonstruktion befestigt, siehe Abbildung 6.4.



Abbildung 6.4: Lagerung der Dehnungsmessaufnehmern und Aufbau des Betonprobe

Nach 5 bis 7 Tagen wurde die Schalung der Betonkörper entfernt. Unmittelbar nach dem Ausschalen erfolgte ein stufenweiser Belastungsversuch der Betonkörper. Die dabei ermittelten Dehnungen der Messinstrumente wurden in Spannungen umgerechnet. Zu unterschiedlichen Zeitpunkten wurden zusätzliche Belastungsversuche der Betonkörper ausgeführt, sodass die bei gleicher Belastung aus den Messinstrumenten berechneten Spannungen mit zunehmender Abbindezeit ermittelt werden können. Zusätzlich wurde die Temperaturentwicklung während der gesamten Versuchszeit bis zum Abbinden des Betons ermittelt.

6.3 Versuchsergebnisse

6.3.1 Temperatur-, Dehnungs- und Spannungsänderungen

6.3.1.1 Messergebnisse im jungen Beton

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Temperaturmessungen (Versuch 1) dargestellt. Für den Versuch wurde ein B35 mit einem w/z -Wert von 0,67 und einem CEM I 42,5 verwendet.

In Versuch 1 wurden die Temperaturmessinstrumente innerhalb des Versuchskörpers in einer Ebene in der Mitte des Versuchskörpers eingebaut. Abbildung 6.5 stellt die gemessenen Temperaturen von drei Messelementen, im Verlauf der ersten 24 Stunden der Versuchsdurchführung dar. Zusätzlich ist der Temperaturverlauf über den Querschnitt aufgezeigt.

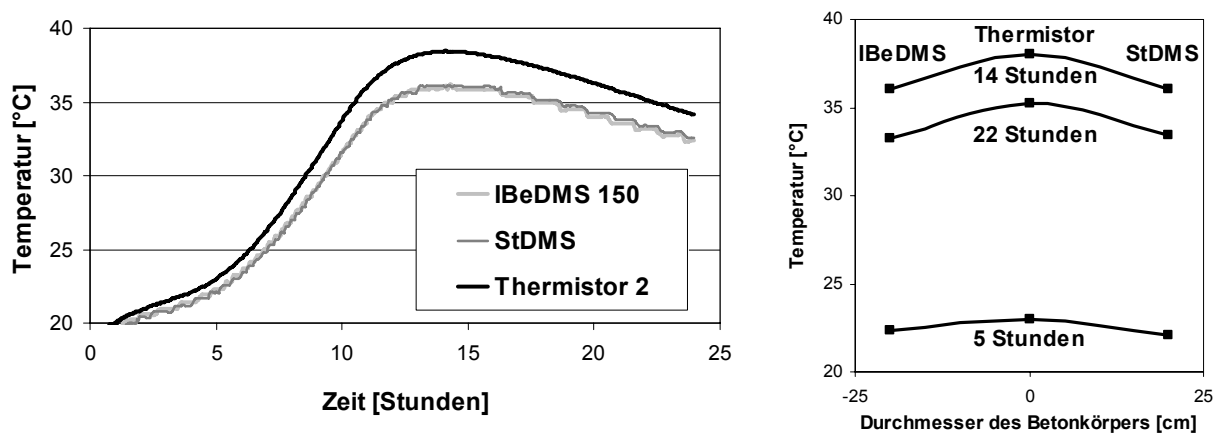


Abbildung 6.5: Gemessene Temperaturänderungen an verschiedenen Positionen im Beton

Der Verlauf innerhalb des Querschnittes ist vergleichbar mit der theoretischen Verteilung (Abbildung 3.16). Die geringen Temperaturdifferenzen stellen einen nahezu einheitlichen Temperatur- und Spannungsverlauf dar. Die Versuchsergebnisse einzelner Messinstrumente müssen daher nicht veränderten Temperatur- und Spannungsgradienten angepasst werden.

Kurz nach dem Betonieren führt die Hydratationswärme zu einem Temperaturanstieg. Während des Temperaturmaximums wird auch eine maximale Druckspannung von 340 kN/m², ohne das eine äußere Belastung aufgebracht wurde, gemessen. Mit Abkühlen des Betons nimmt auch die Druckspannungen wieder ab (Abbildung 6.6). Nach mehreren Tagen wird eine Druckspannungswert unterhalb des Kalibriernullpunktes ermittelt.

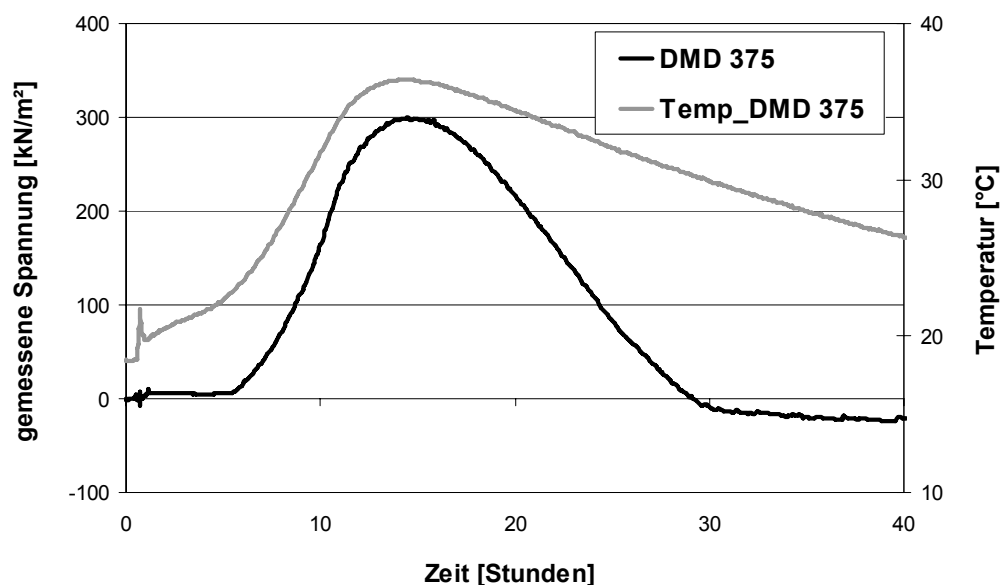


Abbildung 6.6: Temperatur- und Spannungsverlauf zu Versuchsbeginn

Abbildung 6.7 zeigt der mit dem Betondehnungsgeber GBeDMS 250 ermittelten Dehnungs- und Temperaturverlauf. Dieser gleicht der Temperaturkurve in Abbildung 6.6. Die gemessene Dehnung ist während der ersten 10 Stunden nahezu konstant und ist

nachfolgend durch eine kontinuierliche Abnahme gekennzeichnet. Die gemessenen Dehnungen sind wie bei der Druckmessdose nach ausreichender Zeit geringer als der Ausgangswert.

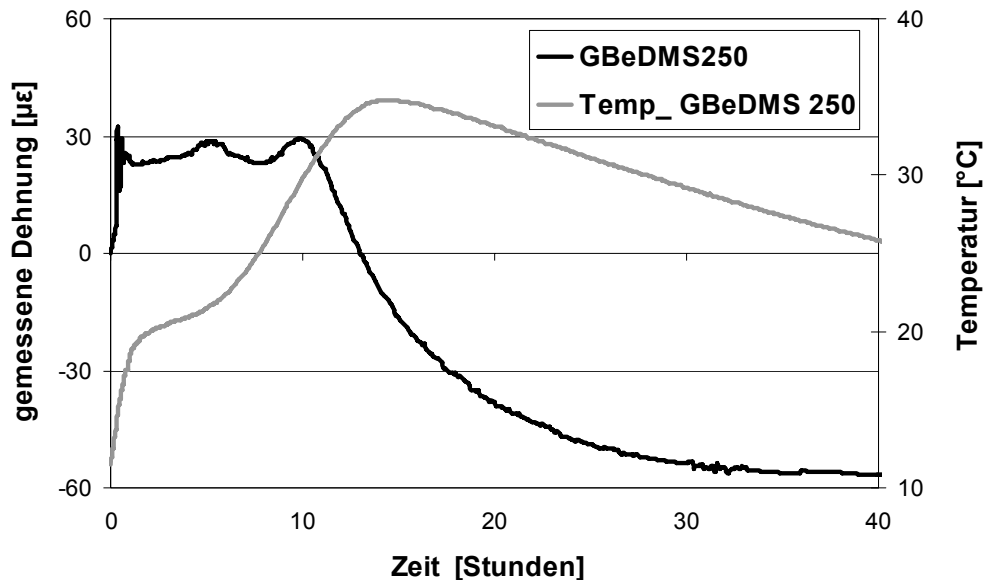


Abbildung 6.7: Temperatur und Dehnungsverlauf im jungen Beton (Versuch 1)

In Abbildung 6.8 sind die aus den Dehnungen ermittelten wirkenden Spannungen unterschiedlicher Dehnungsgeber während der ersten zwei Tage dargestellt. Die von beiden Messgeräten ermittelten Spannungen sind nahezu identisch mit der von der Druckmessdose ermittelten Spannung. Mit Anstieg der Betonfestigkeit reduziert sich die gemessene Spannung. Die max. Spannung wird kurz vor dem Temperaturmaximum erreicht (Abbildung 6.8).

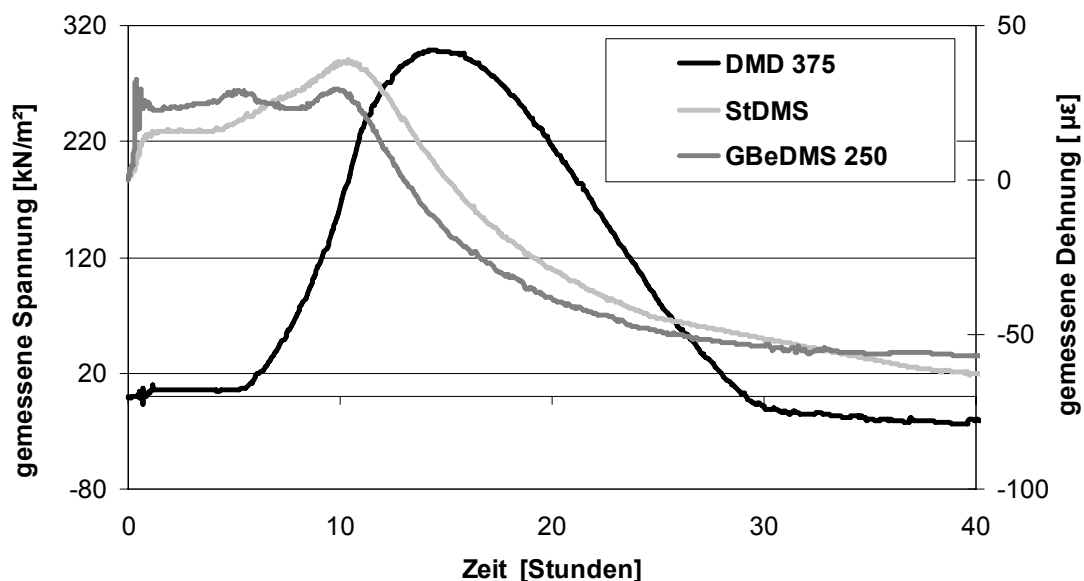


Abbildung 6.8: Spannungs- und Dehnungsverlauf im jungen Beton (Versuch 1)

6.3.1.2 Temperatur-, Dehnungs- und Spannungsverlauf im erhärteten Beton

6.3.1.2.1 Betondruckmessdose

Nach sieben Tagen wurde der Betonkörper ausgeschalt, und die Betondruckmessdose nachgespannt. Mit zunehmender Zeit steigen die von der Druckmessdose gemessenen Spannungen auf über 1.400 kN/m^2 an. Nach 30 Tagen blieb die Spannung nahezu konstant und nahm während der nachfolgenden ca. 150 Tage wieder ab (Abbildung 6.9). Die Abnahme wird in der Relaxation und dem Austrocknen des Betonkörpers gesehen.

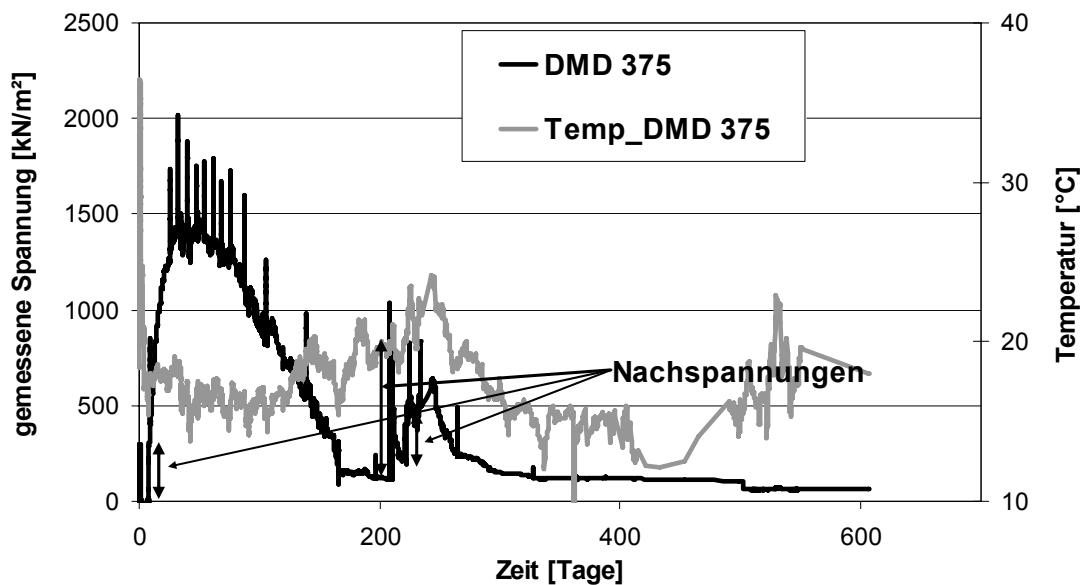


Abbildung 6.9: Temperatur und Spannungsverlauf im Beton (Versuch 1)

Nach Abnahme der Spannungen (ca. 200 Tage) ergeben sich nahezu keine Änderungen. Nach ca. 210 Tagen wurde die Druckmessdose zum zweiten Mal nachgespannt. In den nachfolgenden Tagen ergibt sich das gleiche Verhalten: erst ein Anstieg der gemessenen Spannung, anschließend eine Reduzierung. Ein ähnliches Ergebnis brachte die dritte Nachspannung.

Zur Ermittlung der von der Druckmessdose durch externe Belastungen ermittelten Spannungen wurde der Betonkörper zu verschiedenen Zeitpunkten belastet. Abbildung 6.10 stellt die einzelnen Ergebnisse dar. Mit zunehmender Zeit wird trotz der mehrfachen Nachspannung keine Übereinstimmung von gemessenen und aufgetragenen Spannungen ermittelt.

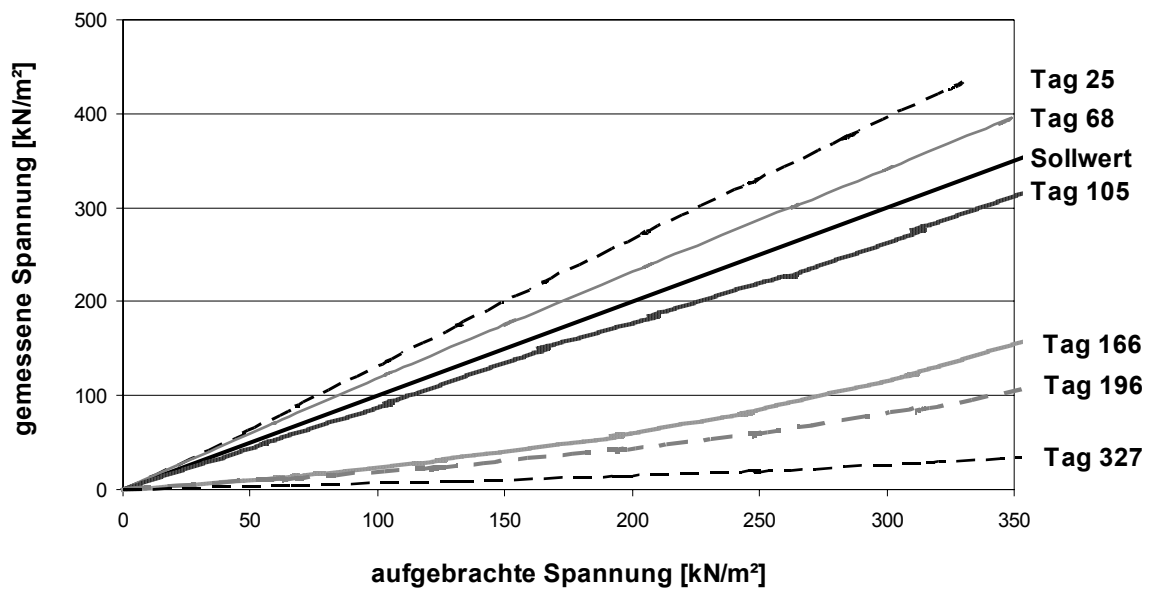


Abbildung 6.10: Gemessene vs. aufgebrachter Spannung, unterschiedliche Zeiten nach Betonieren

6.3.1.2.2 Dehnungsmessgeber

Abbildung 6.11 stellt den mit den einzelnen Dehnungsgebern ermittelte Dehnungsverlauf dar. Zusätzlich sind die Dehnungen der Messgeber in Abbildung 6.12 den Ergebnissen der Druckmessdose gegenübergestellt.

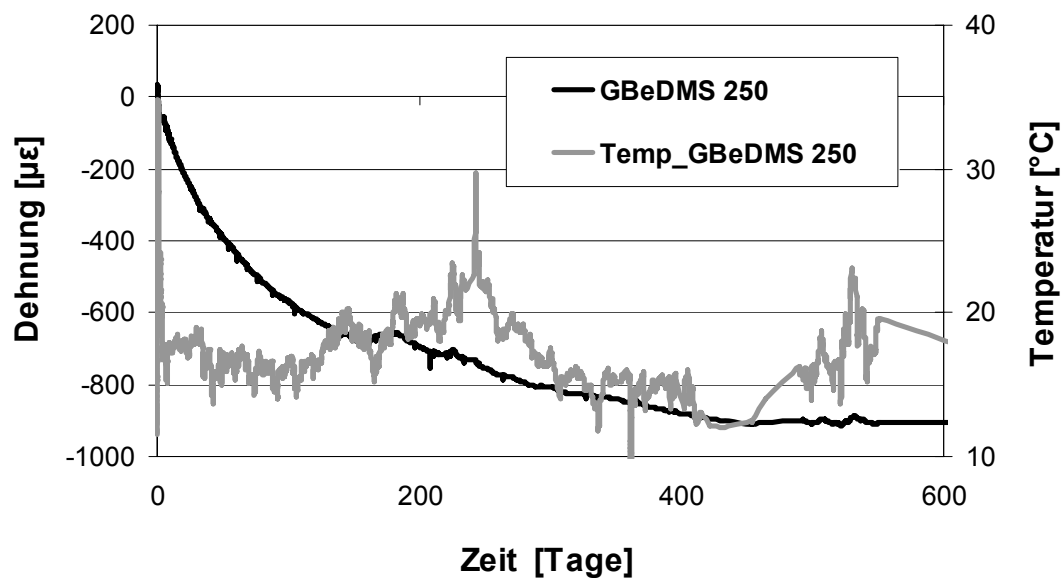


Abbildung 6.11: Dehnungs- und Temperaturverlauf im Beton über die Zeit (Versuch 1)

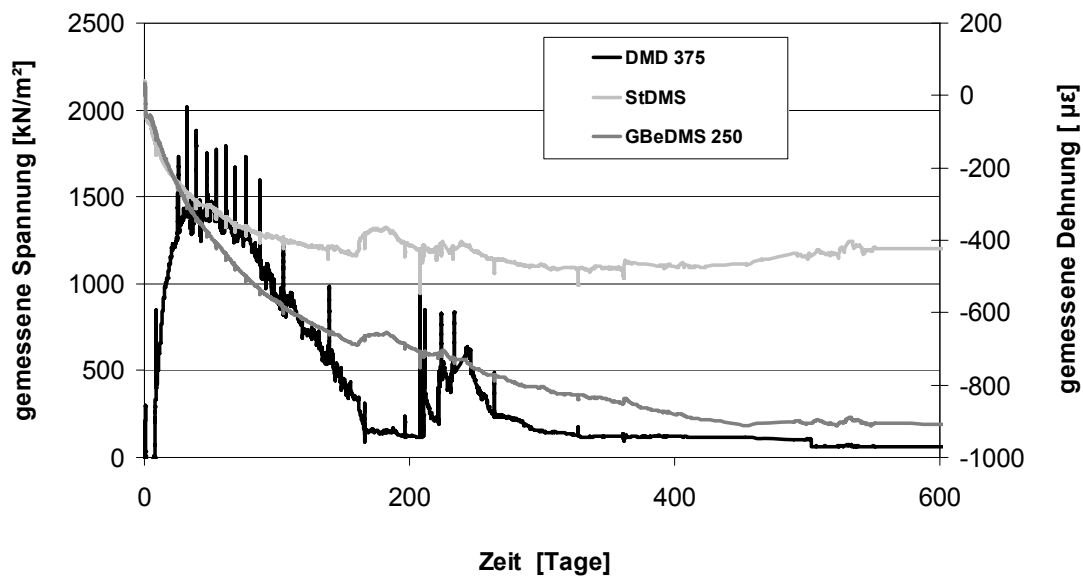


Abbildung 6.12: Dehnungs- und Spannungsverlauf im Beton (Versuch 1)

Während der ersten nahezu 400 Tage wurden mit GBeDMS 250 stetige Dehnungsänderungen ermittelt. Mit dem StDMS wurden nach ca. 200 Tagen keine Veränderungen der Dehnungen mehr ermittelt. Die Abweichung der Dauer der Dehnungsänderung der einzelnen Messergebnisse ist durch die Eigensteifigkeit der Messinstrumente zu erklären. Die größere Steifigkeit und Länge des StDMS mittelt die Dehnungsbildung im gesamten Verbundkörper. Die kurze Messgeberlänge ermittelt lokale Dehnungen in der Mitte des noch nicht abgebundenen Körpers. In Abbildung 6.13 sind die aus den Dehnungen ermittelten Spannungen innerhalb des Betonkörpers dargestellt.

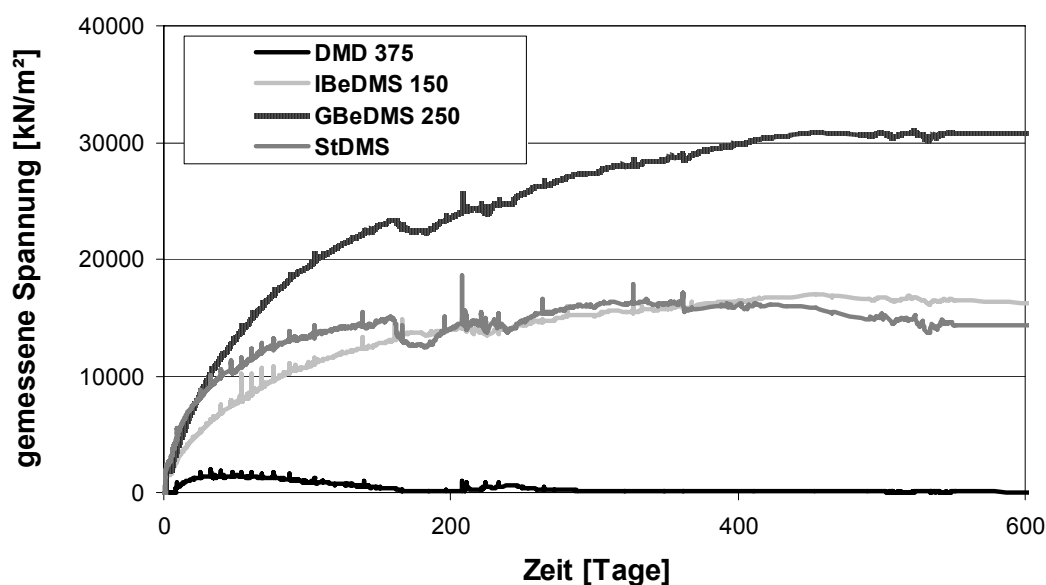


Abbildung 6.13: Berechnete wirkende Spannung (Versuch 1)

Die Temperatur war während der Beobachtungszeit nahezu konstant und kann nicht zu einer Veränderung der gemessenen Spannungen geführt haben. Durch die mehrfach ausgeführte Belastung wurden keine sichtbaren Spannungsänderungen innerhalb des Versuchskörpers beobachtet. Ohne ausreichende Korrektur können aus den Ergebnissen nicht die in situ herrschenden Spannungsänderungen ermittelt werden.

6.3.2 Auswirkung variierender Zementarten

Durch die Verwendung variierender Zementarten kann die Hydratationswärme im Beton verändert werden. Mit zunehmendem Hüttensandanteil reduziert sich die Reaktions- und Erhärtungsgeschwindigkeit bei größerer Nacherhärtung. Die maximale Druckfestigkeit ist im Vergleich zu Zementen ohne Hüttensandanteil zu Beginn geringer, nimmt mit zunehmender Zeit jedoch zu.

In dieser Untersuchung wurden drei verschiedene Zementarten der Firma Deuna Zement GmbH verwendet: Portlandzement [CEM I 42,5], Portlandhüttenzement [CEM II/A-S 52,5 R] und Hochofenzement [CEM III/B 32,5], die in Tabelle C.3 und C.4 im Anhang C näher spezifiziert sind. Die Versuche wurden mit w/z-Werte von 0,50 und 0,67 durchgeführt.

6.3.2.1 W/Z = 0,50

In der Versuchsreihe wurden drei identische Betonkörper mit verschiedenen Zementarten erstellt. Der Durchmesser der Betonkörper beträgt 50 cm, die Höhe 48 cm. Weitere Angaben sind in Tabelle C1 und C2 in Anhang C zusammengestellt. Die Temperatur- und Dehnungsverläufe der Betonkörper in den ersten fünf Tagen sind in Abbildung 6.14 und Abbildung 6.15 dargestellt.

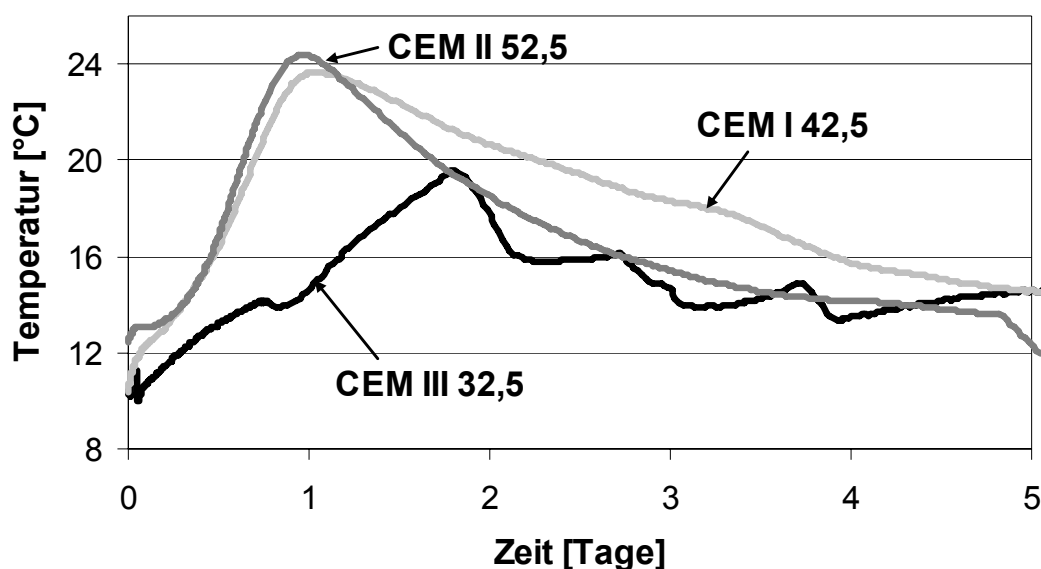


Abbildung 6.14: Temperaturentwicklung bei verschiedenen Zementarten, w/z-Wert 0,50

In Abhängigkeit der Zementart erhöht sich die gemessene Maximaltemperatur und beschleunigt sich der zeitliche Verlauf der Temperaturentwicklung innerhalb der Betonkörper. Der Betonkörper mit CEM I 42,5 weist die größte Dehnungsänderung des Messgebers GBeDMS 155 auf, die jedoch nahezu identisch mit dem Dehnungsverlauf des Betonkörpers mit CEM II 52,5 ist. Die kleinste Dehnungsänderung wird beim CEM III 32,5 ermittelt.

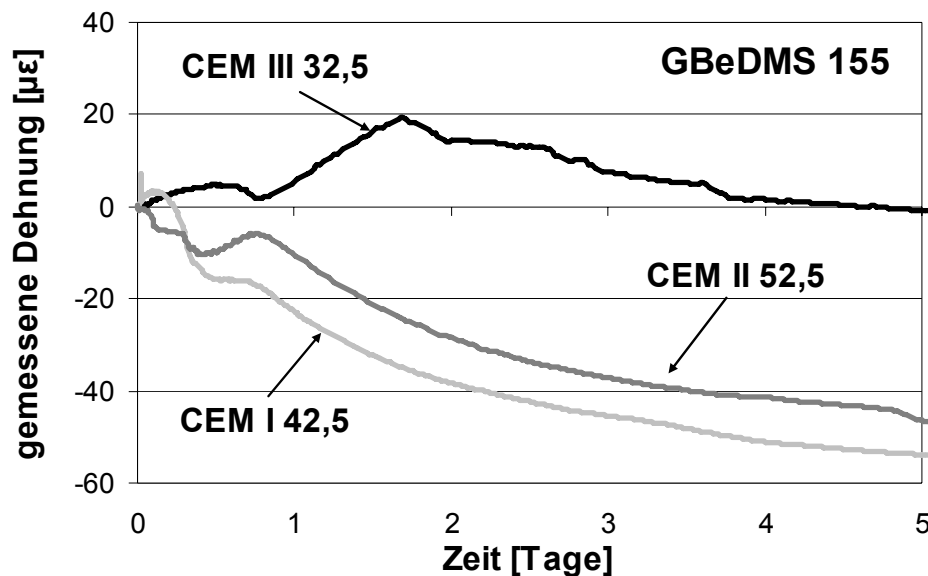


Abbildung 6.15: Dehnungsverlauf bei verschiedenen Zementarten, w/z-Wert 0,50

Während des Austrocknens verlaufen die ermittelten Dehnungsänderungen nahezu linear, siehe Abbildung 6.16. Die während der ersten Tage gemessene nahezu lineare Rate der Dehnungsänderung verändert sich während der 150 tägigen Austrocknung nicht.

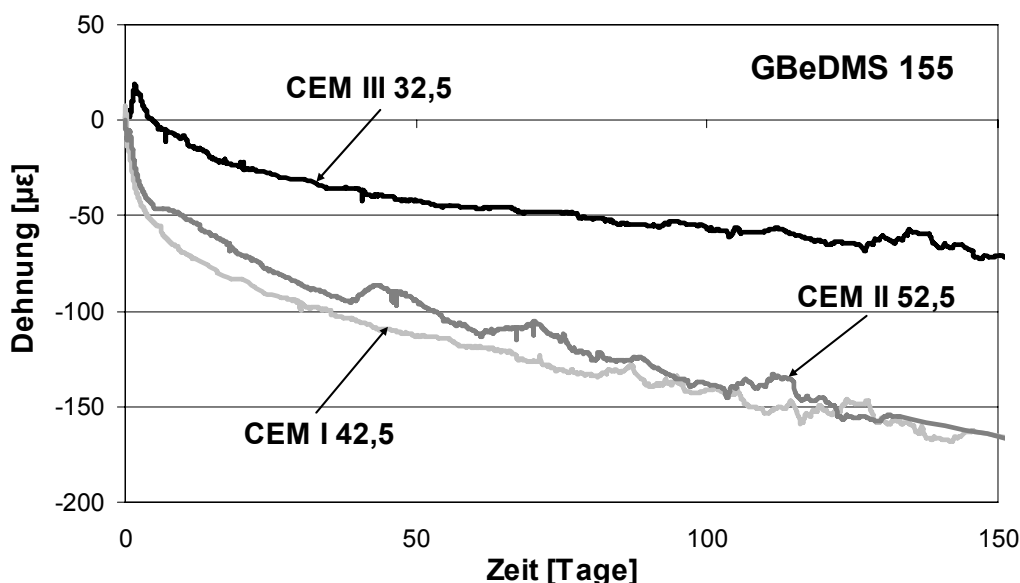


Abbildung 6.16: Dehnungsverlauf in Betonkörpern, variierende Zementart, w/z-Wert 0,50

6.3.2.2 $W/Z = 0,67$

Identische Versuche wurden mit einem w/z-Wert von 0,67 wiederholt. Die Spezifizierungen der Versuche sind in Tabelle C.1 und C.2, Anhang C dargestellt. Die Temperaturentwicklung in den ersten fünf Tagen verläuft ähnlich den Untersuchungen mit einem w/z- Wert von 0,50. Die Dehnungsverlauf in den erste 5 Tagen (Abbildung 6.17) zeigt ebenso ein ähnliche Verlauf. Die geringfügige Änderung im Dehnungsverlauf für den Fall CEM I 42,5 ist auf das dabei zur Anwendung kommende Fließmittel zurückzuführen.

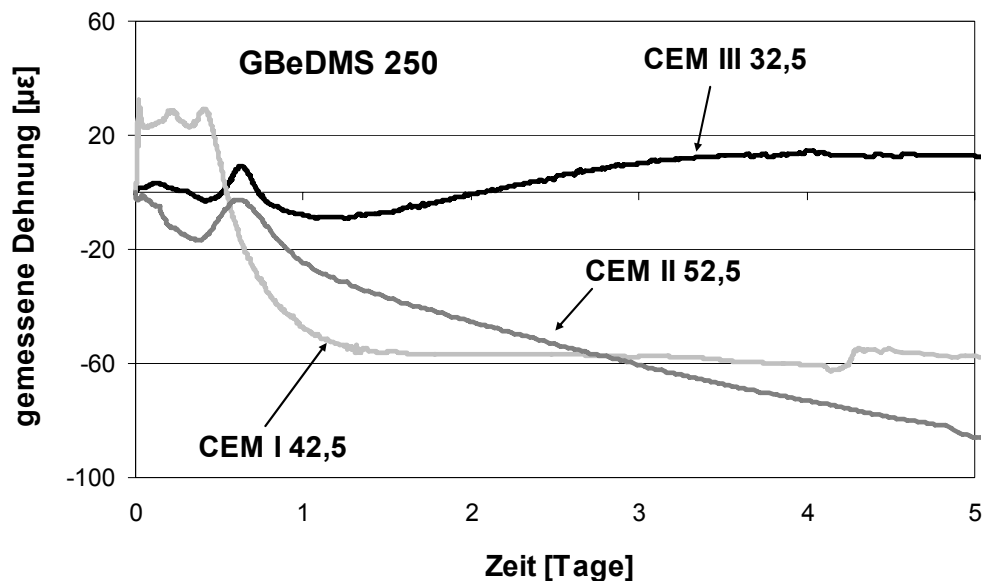


Abbildung 6.17: Gemessene Dehnungen bei Betonkörpern, w/z-Wert = 0,67

Den Dehnungsverlauf über 200 Tage zeigt Abbildung 6.18. Wiederum ist die Dehnungsänderung von Beton mit CEM III 32,5 am kleinsten, der Gesamtverlauf der Dehnungen zeigt jedoch deutliche Änderungen auf. Durch den höheren w/z- Wert ergeben sich deutlich größere absolute Dehnungsänderungen, die durch die Austrocknung der größeren Wassermenge erklärt werden kann. In allen Versuchskörpern ist keine Annäherung der Dehnungsänderungen an einen Grenzwert zu erkennen.

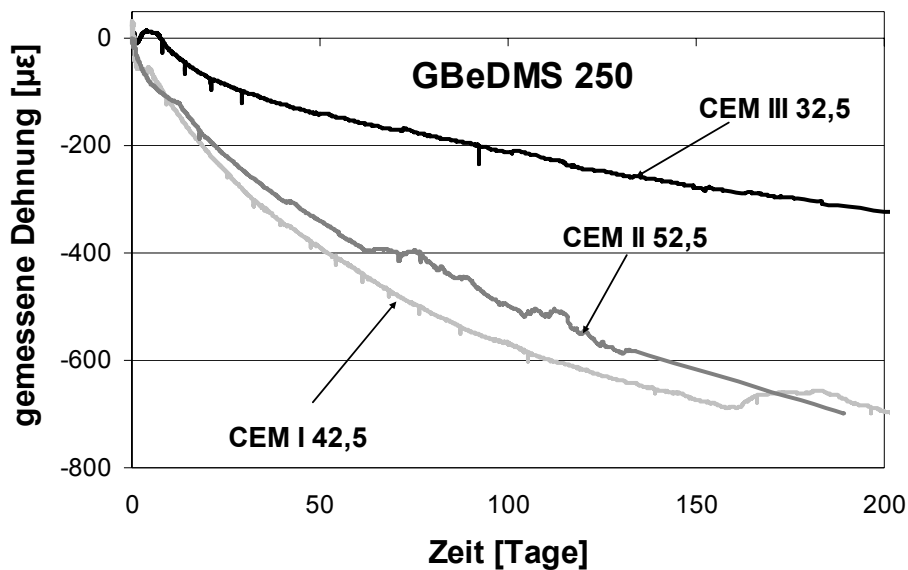


Abbildung 6.18: Dehnungsverlauf, Betonkörpern mit verschiedenen Zementarten, w/z-Wert 0,67

6.3.3 Einfluss des w/z- Wertes

In dem Verhältnis von Wasser und Zement (w/z- Wert) Verhältnis, drückt sich der Wasseranteil innerhalb des Betons aus. Mit größerem w/z-Wert ist die Wassermenge, die durch Austrocknung dem Beton entzogen werden kann, größer. Dadurch ergibt sich ein größeres Schwinden und die Entwicklung größerer gemessener Dehnungen. Bei der Ermittlung der wirkenden Spannungen ergibt sich eine steigende Notwendigkeit, die Messwerte von den aufgetragenen Lasten trennen zu können. Die Zeit, in der Dehnungsänderungen ermittelt werden, nimmt mit steigendem w/z- Wert zu, die Temperatur während der Hydratation hat in den durchgeführten Versuchen jedoch nur einen untergeordneten Einfluss auf die gemessenen Spannungen. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass der w/z- Wert allein keinen Rückschluss auf die auftretenden Dehnungsänderungen ermöglicht. Zur verbesserten Darstellung werden daher die einzelnen Zementarten betrachtet.

6.3.3.1 Zement CEM I 42,5

6.3.3.1.1 Betonkörper mit D=50 cm und H=48 cm

Es wurden drei Betonkörper mit einem Durchmesser von 50 cm und einer Höhe von 48 cm mit verschiedenen w/z-Werten (0,50/ 0,61/ 0,67) erstellt, vergleiche Anhang C, Tabelle C1 und C2. Der Versuchskörper mit einem w/z-Wert von 0,50 wurde aus Gründen der Verarbeitbarkeit mit einem Fließmittel (30 mL pro kg Zement) erstellt. Die Ergebnisse in Abbildung 6.19 zeigen deutlich, dass mit zunehmendem w/z-Wert eine größere Maximaltemperatur durch Abbindeprozess erzeugt wird, die zu früheren Zeitpunkten gemessen wird. Der nachfolgende Temperaturabfall ist mit höherer Maximaltemperatur größer, nach zwei Tagen ergibt sich ein annähernd gleicher Verlauf.

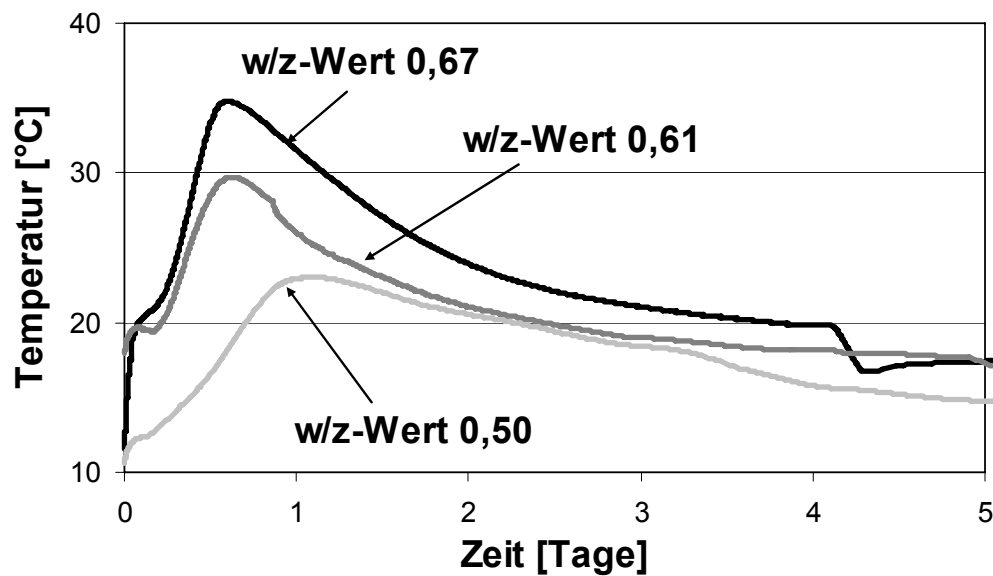


Abbildung 6.19: Temperaturverlauf bei verschiedenen w/z-Werten, CEM I 42,5

Der Dehnungsverlauf lässt sich nicht aus der Temperaturentwicklung ableiten. Für jeden Betonkörper ergeben sich vollständig abweichende Dehnungsänderungen, die sowohl positiv als auch negativ sein können. Sowohl für einen w/z- Wert von 0,61 als auch 0,67 ergeben sich nach einem Tag bis zum Ausschalen (fünf Tage) nahezu keine Dehnungsänderungen, siehe Abbildung 6.20. Trotz des geringsten w/z- Wertes von 0,5 ergeben sich in dem Betonkörper die größten Dehnungsänderungen. Wahrscheinlich werden durch das Fließmittel die Abbindezeit und die Dehnungsänderungen im jungen Beton vergrößert.

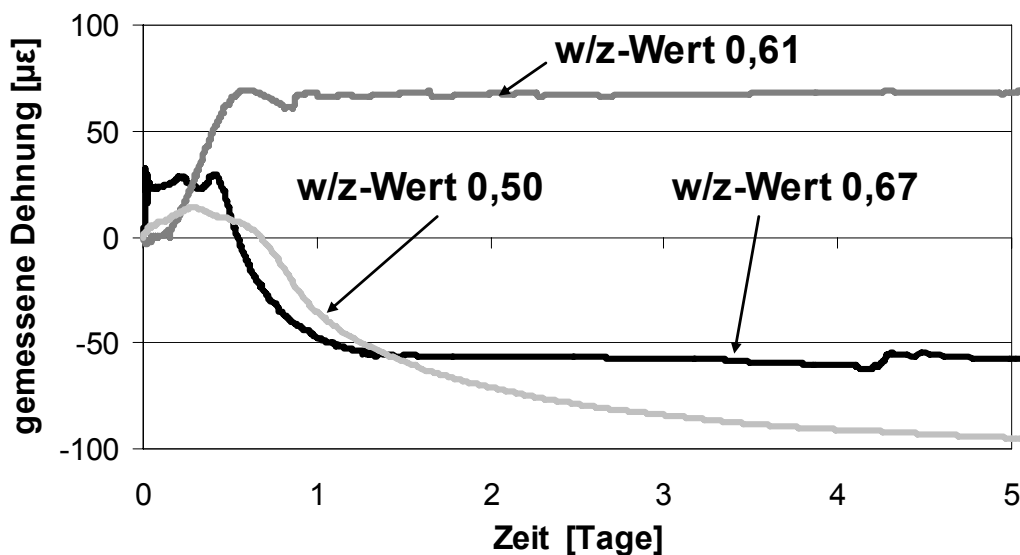


Abbildung 6.20: Dehnungsverlauf in den ersten fünf Tagen bei verschiedenen w/z-Werten, CEM I 42,5

Die Dehnungsänderungen in den ersten 200 Tagen nach Ausschalen der Betonkörper sind in Abbildung 6.21 dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, dass unmittelbar nach dem

Ausschalen deutliche Dehnungsänderungen auftreten. Mit Ausnahme des Betonkörpers mit einem w/z -Wert von 0,61 treten mit größerem w/z -Wert größere Dehnungen auf. Die Dehnungen des Betonkörpers mit einem w/z -Wert von 0,61 sind nicht repräsentativ, da der Verlauf sowohl Reduktionen als auch Dehnungserhöhungen, die nicht erklärbar sind, aufweist. Außer bei einem w/z -Wert von 0,61 ist im Beobachtungszeitraum von 200 Tagen keine Annäherung an einen Grenzwert zu erkennen.

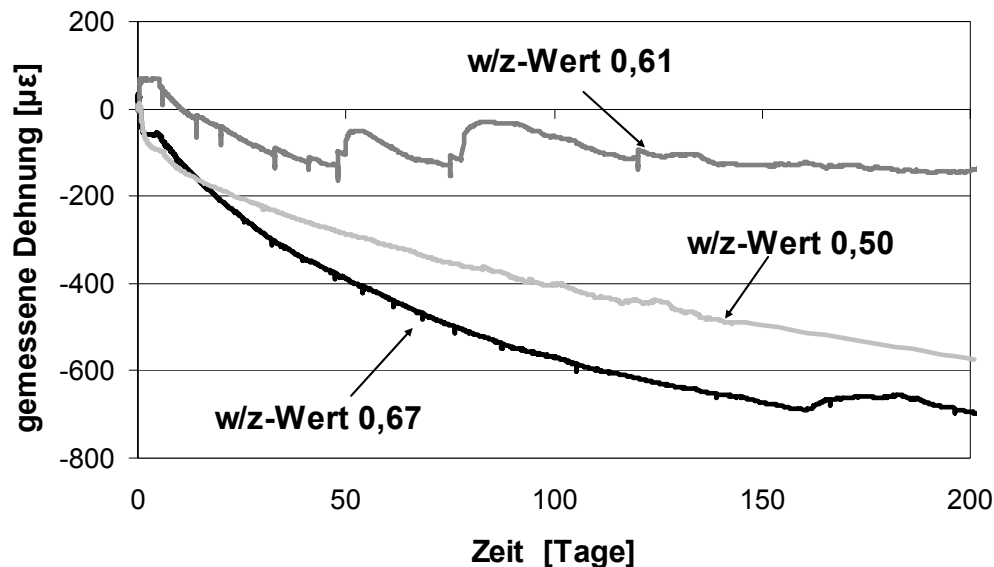


Abbildung 6.21: Dehnungsverlauf bei verschiedenen w/z -Werten, CEM I 42,5

6.3.3.1.2 Betonkörper mit $D=30$ cm und $H=48$ cm

Zur Ermittlung des Einflusses des w/z - Wertes bei unterschiedlichen Betonkörpergrößen wurden zusätzliche Versuche durchgeführt. Die erstellten Betonkörper haben einen Durchmesser von 30 cm, die Höhe beträgt wiederum 48 cm. Weitere Angaben sind in Anhang C, Tabelle C.1 und C.2 zusammengestellt. Durch die veränderten Abmessungen ergeben sich leicht veränderte Dehnungsverläufe. Die absoluten Dehnungsänderungen betragen ein Vielfaches der Dehnungsänderungen im Betonkörper mit größeren Abmessungen. Wie in Abbildung 6.23 dargestellt, verlaufen die Änderungen nahezu linear und streben auch nach 200 Tagen keinem Grenzwert entgegen. Die Rate der Dehnungsänderungen ist hierbei nahezu unabhängig vom w/z - Wert, die absoluten Dehnungsänderungen entstehen schon in den ersten fünf Tagen, siehe Abbildung 6.22. Entgegen theoretischen Überlegungen sind die Dehnungsänderungen in den ersten fünf Tagen bei einem w/z -Wert von 0,50 größer als für einen w/z -Wert von 0,67.

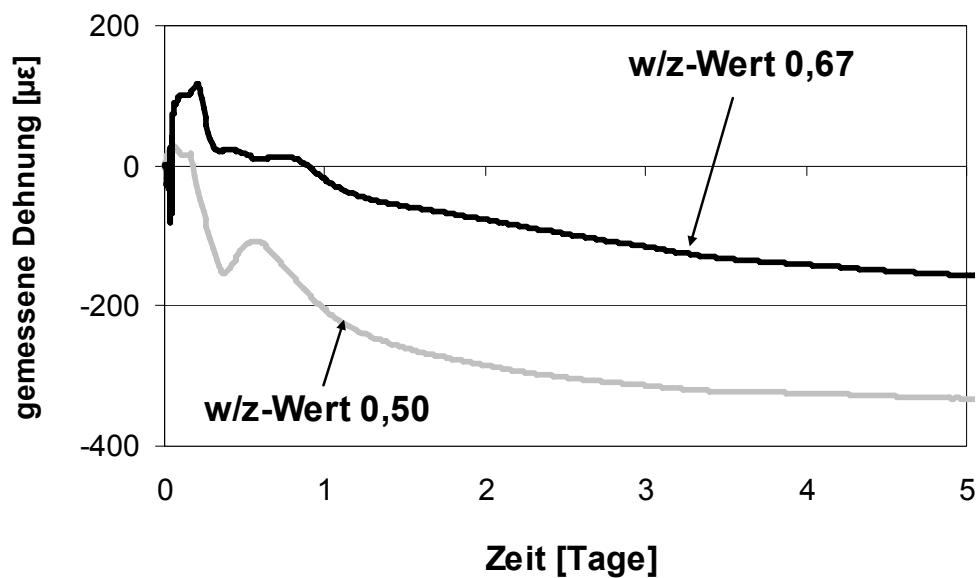


Abbildung 6.22: Dehnungsverlauf in den ersten fünf Tagen, D = 30 cm, CEM I 42,5

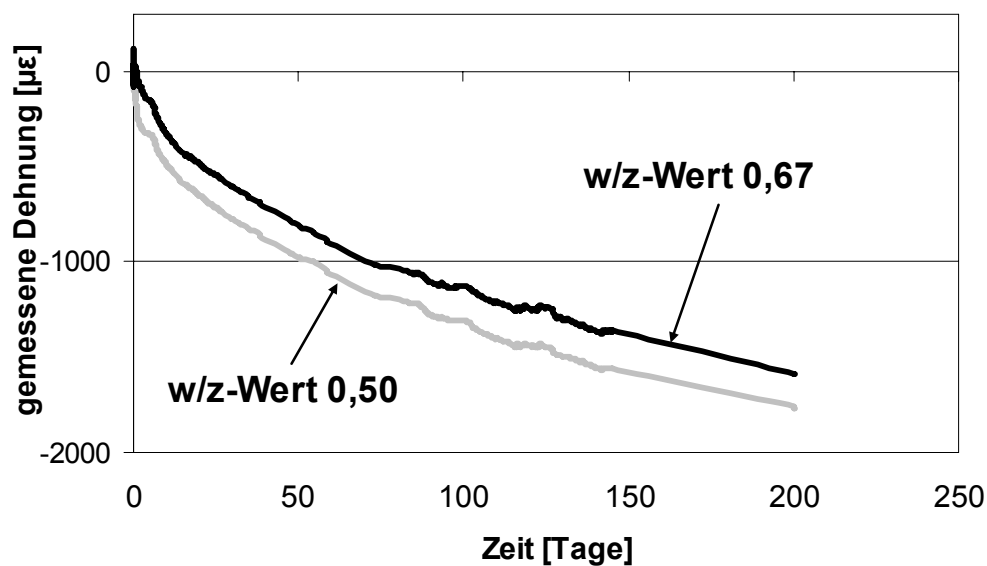


Abbildung 6.23: Dehnungsverlauf in den ersten 200 Tagen, D = 30 cm, CEM I 42,5

6.3.3.2 Zement CEM II/A-S 52,5

Vergleichbare Untersuchungen wurden für einen CEM II/A-S 52,5 mit Betonkörpern mit einem Durchmesser von 50 cm und einer Höhe von 48 cm durchgeführt, siehe Anhang C, Tabelle C.1 und C.2. Entgegen den Untersuchungen mit einem CEM I 42,5 werden beim CEM II/A-S 52,5 mit zunehmender Zeit bei einem w/z-Wert von 0,5 geringere Dehnungsänderungen gemessen, während der Verlauf in den ersten fünf Tagen vergleichbar den für den CEM I 42,5 ermittelten Verläufen ist, siehe Abbildung 6.24 und Abbildung 6.25.

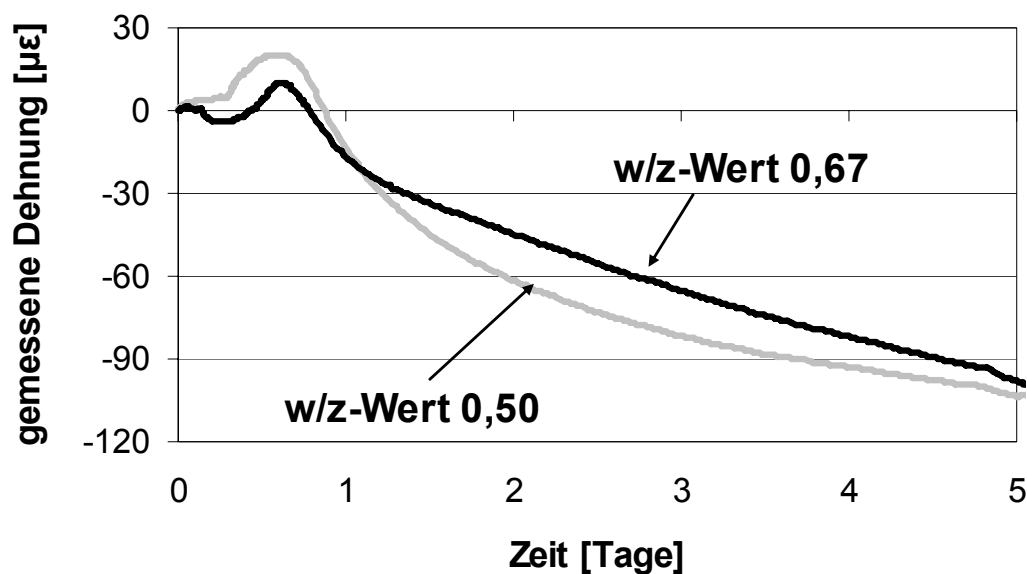


Abbildung 6.24: Dehnungsverlauf in den ersten fünf Tagen, D=50 cm, CEM II 52,5

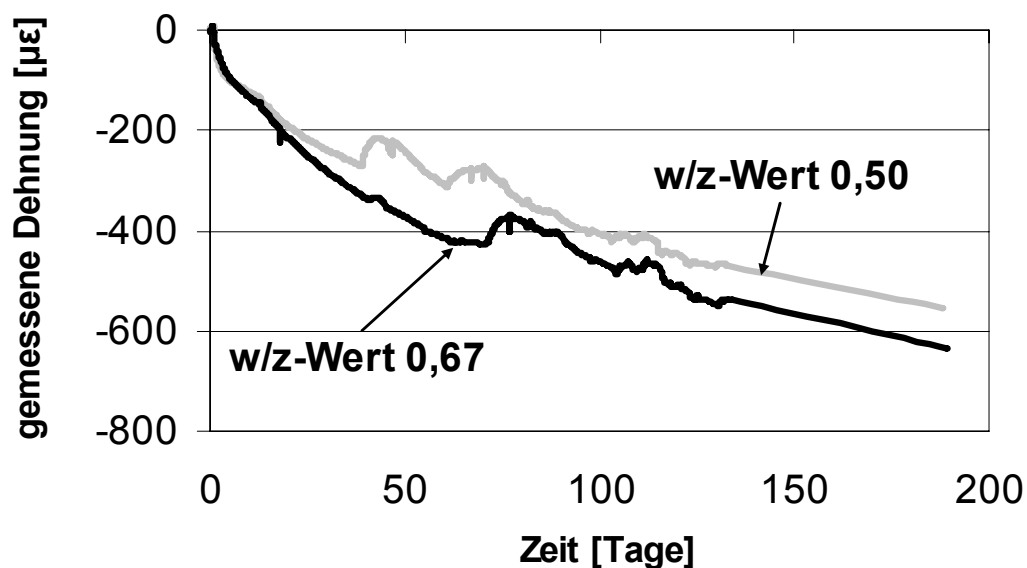


Abbildung 6.25: Dehnungsverlauf in den ersten 200 Tagen, D=50 cm, CEM II 52,5

6.3.3.3 Zement CEM III/B (32,5)

Die Versuche wurden ebenfalls für einen CEM III/B 32,5 mit vergleichbaren Randbedingungen durchgeführt (Anhang C, Tabelle C.1 und C.2). Die Dehnungsänderungen weichen von den bisher dargestellten Ergebnissen ab. Sowohl während der Anfangszeit als auch während der Zeit des Austrocknens ergeben sich geringere Dehnungsänderungen in den Versuchen. Durch die geringere Abbinde­temperatur während der Versuchskörpererstellung werden auch nur geringere Dehnungsänderungen aktiviert. Der zeitliche Verlauf entspricht jedoch den anderen Ergebnissen, auch hier wird im Verlauf der ersten 200 Tage keine Messwertstabilisierung ermittelt. Grund für die geringere

Dehnungsänderung ist die nur geringe Abbinde Temperaturen erzeugende Hydratation des CEM III 32,5, (siehe Abbildung 6.26 und Abbildung 6.27).

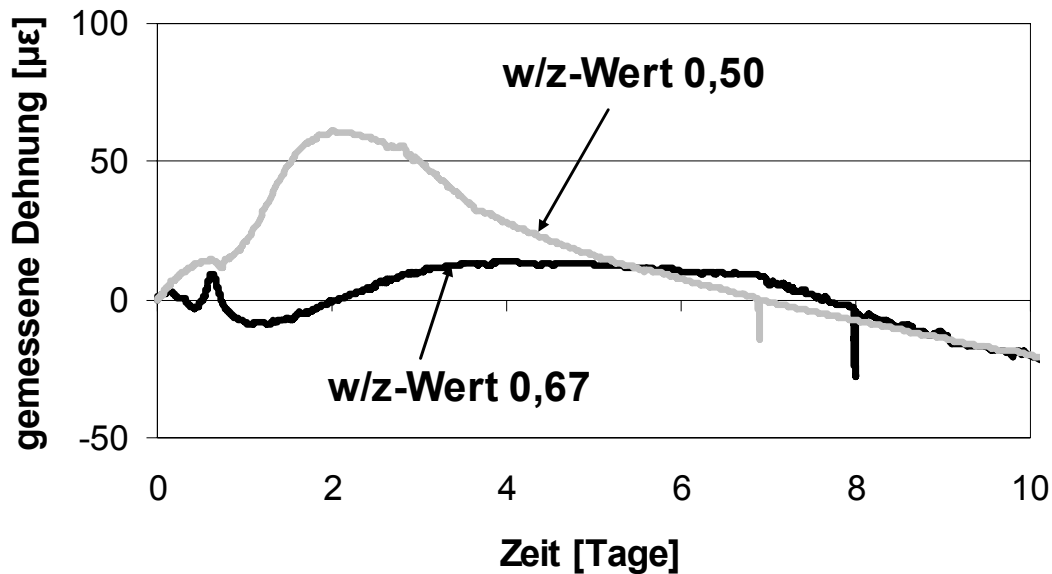


Abbildung 6.26: Dehnungsverlauf in den ersten zehn Tagen, D = 50 cm, CEM III 32,5

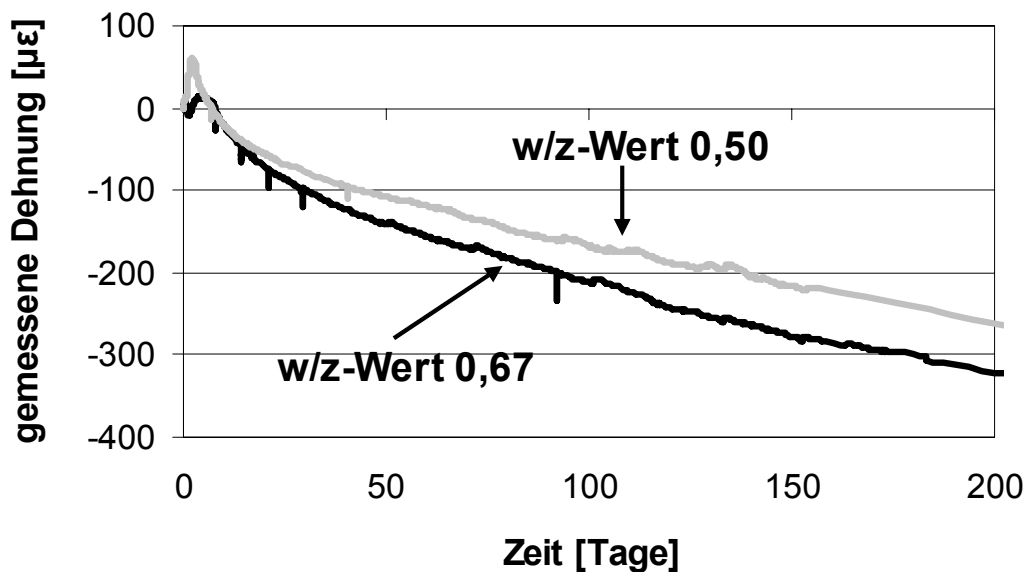


Abbildung 6.27: Dehnungsverlauf in den ersten 200 Tagen, D = 50 cm, CEM III 32,5

6.3.4 Veränderung der Umgebungstemperatur

Aus den durchgeführten Untersuchungen konnte aufgrund der geringen Temperaturdifferenzen keine Abhängigkeit der ermittelten Dehnungs- und Spannungsänderungen von der Temperatur während des Abbindeprozesses festgestellt werden. Die ermittelten maximalen Temperaturdifferenzen liegen zwischen ca. 18 und 25°C, siehe Anhang B, Abbildung 16.

Zur Ermittlung eines möglichen Temperatureinflusses wurden Betonkörper mit integrierten Wärmeschläuchen zur Simulation höherer Abbinde Temperaturen hergestellt. Nachträglich können damit auch die Eigenschaften des Festbetons bei veränderten Umgebungstemperaturen ermittelt werden. Zusätzlich wurden zwei Betonkörper nach Betonierung bei unterschiedlichen Außentemperaturen gelagert um den Einfluss geringerer Umgebungstemperaturen zu ermitteln.

Im Versuch 2, der mit den gleichen Betoneigenschaften wie Versuch 1 hergestellt wurde, wurde eine künstliche Abbinde Temperatur von 62 °C erzeugt. Zu einer vergleichbaren Zeit der max. Temperaturentwicklung in Versuch 1 wurde die Temperatur wieder reduziert, siehe Abbildung 6.28.

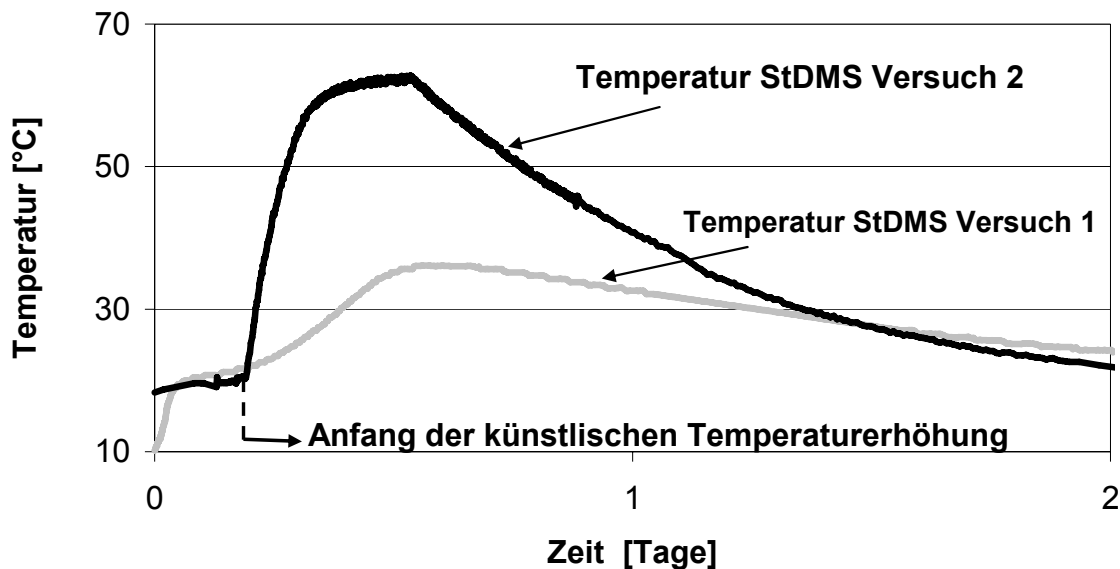


Abbildung 6.28: Temperaturverlauf in den ersten zwei Tagen, Versuch 1 und 2

In Abbildung 6.29 ist der gemessene Dehnungsverlauf in den ersten zwei Tagen dargestellt. Durch die signifikant höhere Abbinde Temperatur wird nur eine geringe Dehnungszunahme, nachfolgend jedoch auch eine reduzierte Dehnungsänderung als in Versuch 1 ermittelt.

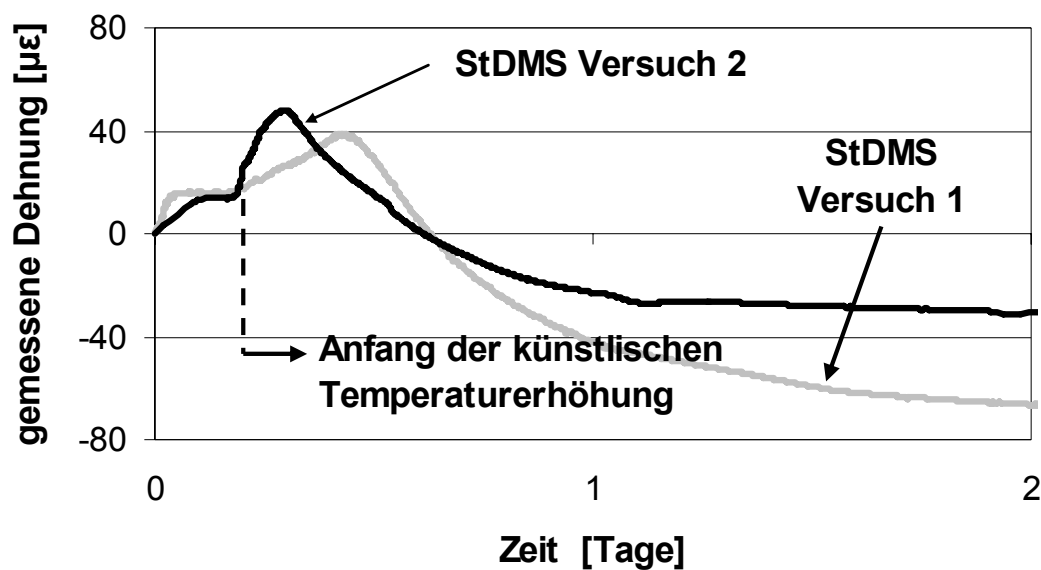


Abbildung 6.29: Dehnungsverlauf in den ersten zwei Tagen, Versuch 1 und 2

Der Temperatur- und Dehnungsverlauf über die ersten 600 Tage von jeweils einem Beton- und einem Stahldehnungsgeber ist Abbildung 6.30 dargestellt. Die nachträglich erzeugte Temperaturerhöhung verändert die Messdaten kurzfristig, hat jedoch keinen Einfluss auf den globalen Austrocknungsprozess. Durch die höhere Abbindetemperatur werden geringere maximale Dehnungsdifferenzen im Versuchskörper ermittelt. Die benötigte Zeit um einen konstanten, vom Austrocknen unbeeinflussten Messwert zu erhalten ist bei beiden Versuchen identisch.

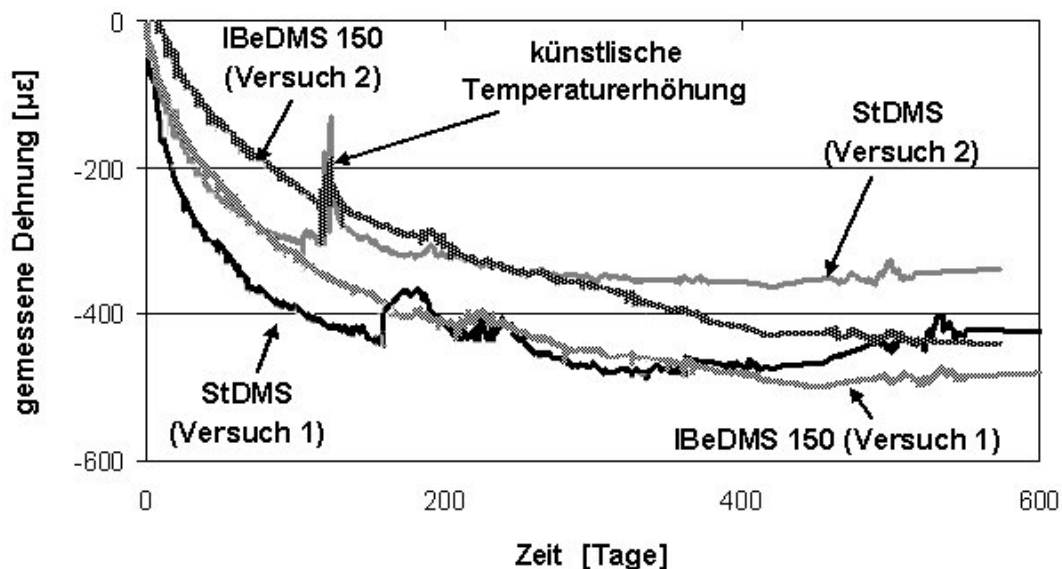


Abbildung 6.30: Vergleich der Dehnung in Versuch 1 und Versuch 2

Zur Ermittlung des Einflusses variierender Umgebungstemperaturen wurden drei Probekörper mit identischen Betoneigenschaften und Probengröße bei Temperaturen von

ca. 0° und 10° und 18° nach Erstellung gelagert. Die Abmessungen betragen $H = 48 \text{ cm}$ und $D = 50 \text{ cm}$. Es wurde ein CEM I 42,5 mit 30 mL pro kg Fließmittel verwendet.

In Abbildung 6.31 und Abbildung 6.32 sind die Temperatur- und Dehnungsverläufe für die unter ca. 18° und 0°C gelagerten Probenkörper in den ersten fünf Tagen dargestellt. Der Dehnungsverlauf des unter 18°C gelagerten Probenkörpers zeigt eine Abhängigkeit von der Abbinde-temperatur, die nahezu unbeeinflusst von der Labortemperatur ist.

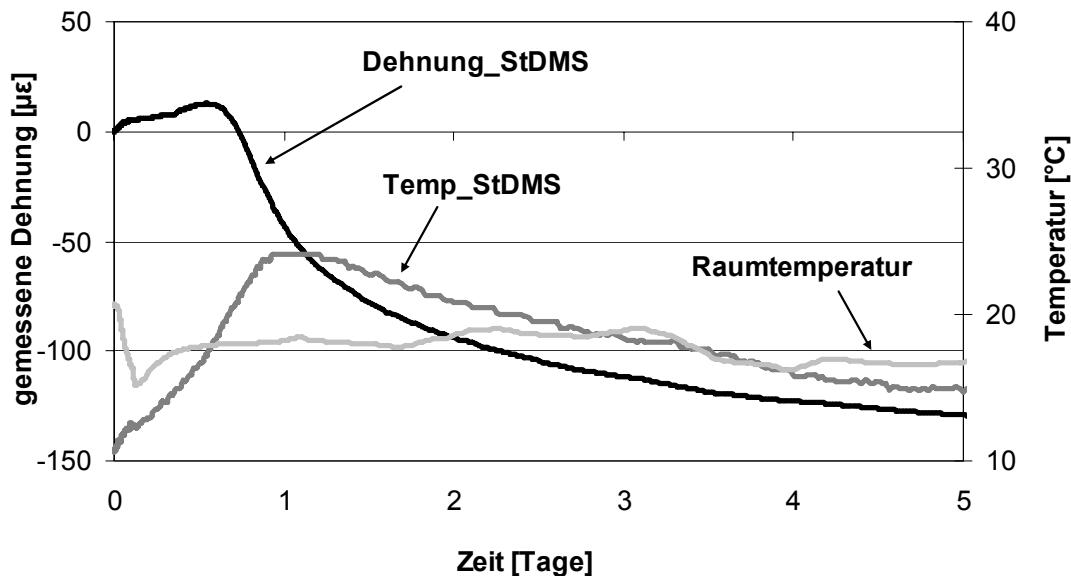


Abbildung 6.31: Dehnungs- und Temperaturverlauf bei Umgebungstemperatur von ca. 18°C

Bei dem unter 0°C gelagerten Betonkörper ergibt sich ein anderer Dehnungsverlauf. Die Abbinde-temperatur des Betons reicht nicht aus, die Eigenschaften des Betons stark zu beeinflussen. Die ermittelten Dehnungsänderungen sind in erster Linie von den Umgebungstemperaturen abhängig, bei Temperaturerhöhungen werden leichte Dehnungszunahmen, bei Temperaturabfall leichte Dehnungsabnahmen ermittelt. Die Dehnungsänderungen sind aber signifikant geringer als bei den unter Laborbedingungen gelagerten Probenkörper.

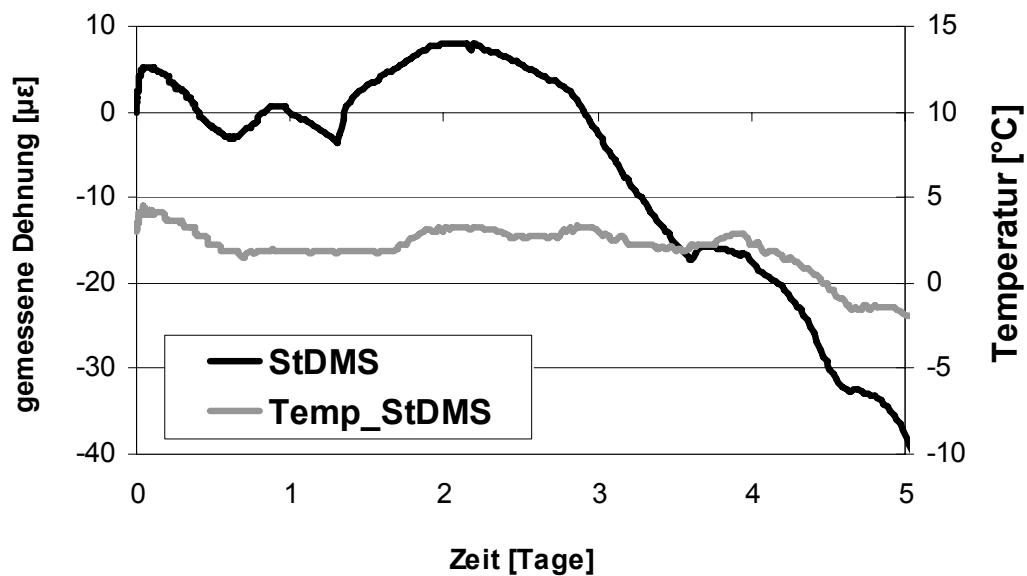


Abbildung 6.32: Dehnungs- und Temperaturverlauf bei Umgebungstemperatur von ca. 0°C

Die Auswirkung der Umgebungstemperaturen auf die Messergebnisse für die Einzelversuche bei Temperaturen von 0° und 12° C sind in Abbildung 6.33 und Abbildung 6.34 dargestellt.

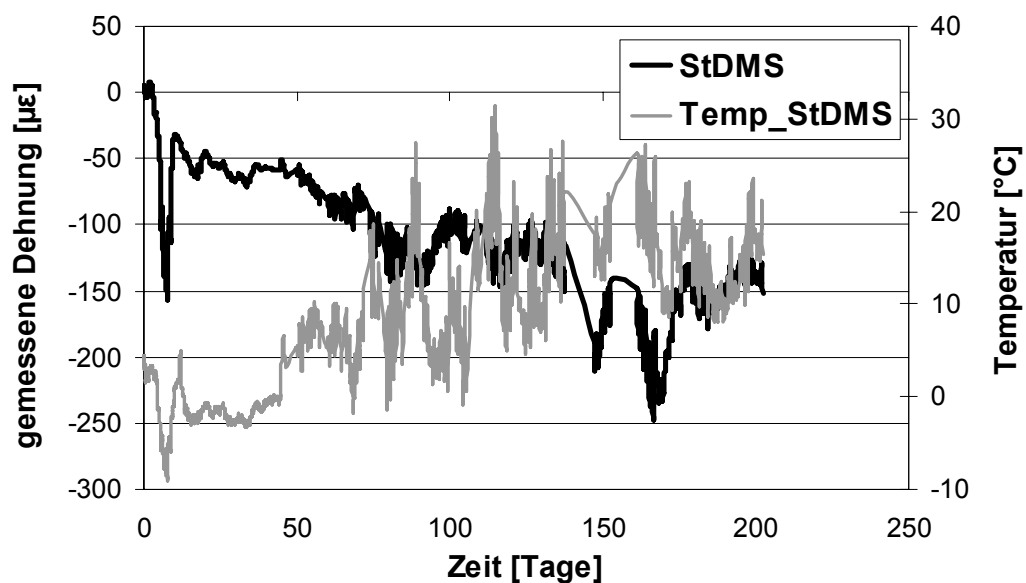


Abbildung 6.33: Dehnungs- und Temperaturverlauf im Betonkörper, Betonierung bei 0°C

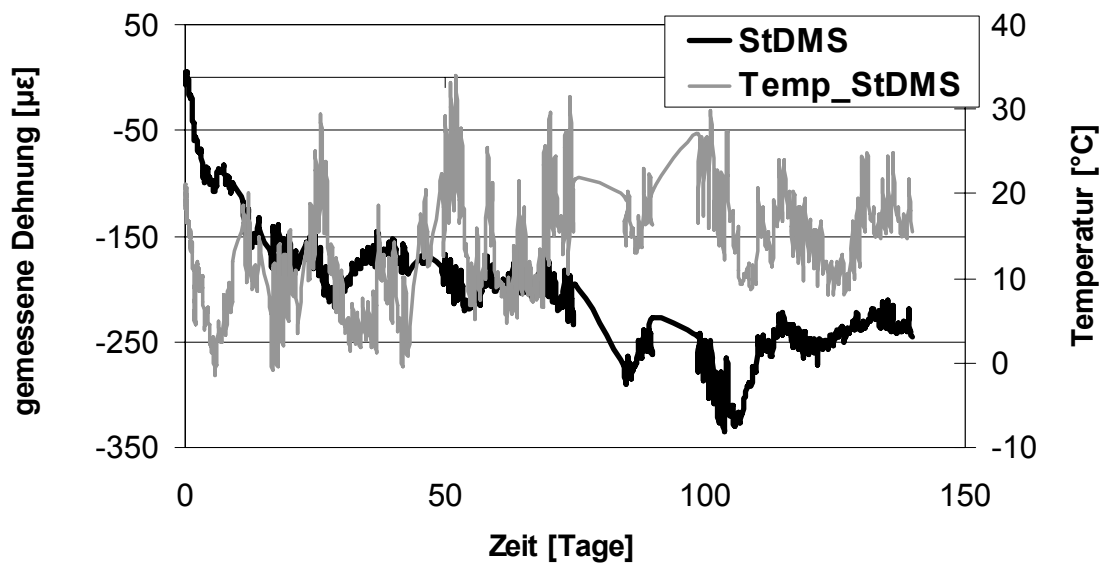


Abbildung 6.34: Dehnungs- und Temperaturverlauf im Betonkörper, Betonierung bei ca. 12°C

Die Ergebnisse sind zusammen mit den von den Stahldehnungsgebern ermittelten Ergebnissen des Laborversuches in Abbildung 6.35 zusammengefasst. Die Zeitachse ist so gewählt, dass die unter Außentemperaturen gelagerten Versuche auf identischen Temperaturänderungen beruhen. Deutlich zu erkennen bei beiden Versuchen ist die Heterogenität der Versuchsdaten, die selbst von Tageszeitlichen Schwankungen beeinflusst wird. Der Laborversuch hingegen unterliegt einem linearen Verlauf, da keine Änderungen der Umgebungstemperatur bestehen.

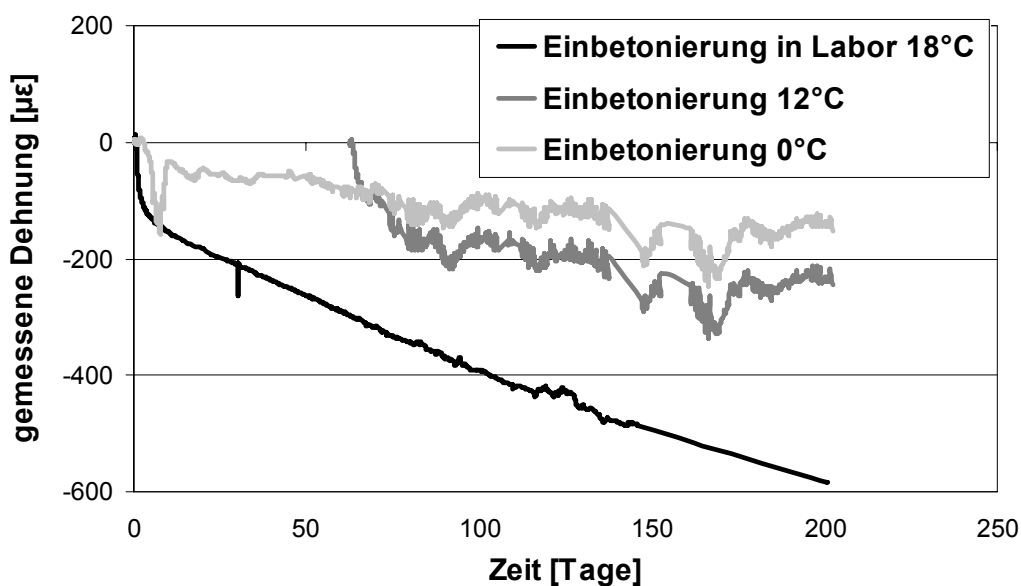


Abbildung 6.35: Vergleich des Dehnungsverlaufs, verschiedene Umgebungstemperaturen

Durch die etwas geringeren Temperaturen direkt nach Betonieren ergeben sich bei dem unter 0°C gelagerten Betonkörper trotz des w/z-Wertes von 0,69 die geringsten

Dehnungsänderungen. Die Dehnungsänderungen sind direkt von der Umgebungstemperatur abhängig, die die Austrocknungseigenschaften bestimmt. Die größten Dehnungsänderungen werden unter Laborbedingungen ermittelt.

6.3.5 Auswirkung variierender Betonkörperabmessungen

Zur Ermittlung des Einflusses der Betonkörperabmessungen wurden 5 Betonkörper mit Höhen von 48 und 25 cm und verschiedenem Durchmesser von 20, 30 und 50 cm erstellt. Der Beton hat einen w/z-Wert von 0,50, es wurde ein CEM I 42,5 mit 30 ml pro Kilo Zement Fließmittel verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Beeinflussung der Messergebnisse durch die veränderte Probenkörperhöhe größer ist als ein variierender Durchmesser.

Abbildung 6.36 stellt den gemessenen Dehnungsverlauf bei variierenden Betonkörpern in den ersten 100 Tagen nach Betonieren dar (in Anhang B, Abbildung 12 wurde es in den ersten 5 Tagen dargestellt). Die Betonkörper mit kleinerer Höhe weisen direkt zu Beginn eine deutlich größere Dehnungsänderung auf, als Probekörper mit dem gleichen Durchmesser aber größerer Probekörperhöhe. Nach einer Weile reduziert sich die Dehnungsänderung und ist annähernd vergleichbar mit den Dehnungsänderungen der Probekörper mit größerer Höhe. Die Dauer der Dehnungsänderung wird nicht durch die Betonkörpergröße beeinflusst.

Durch die größere spezifische Oberfläche an der Luft können kleinere Probekörperhöhen schneller austrocknen als große, sodass sich die größeren Dehnungsänderungen direkt nach dem Ausschalen der Versuchskörper ergeben. Bei gleicher Höhe (48, 25 cm) nimmt die Dehnungsänderung bei zunehmenden Durchmessern zu.

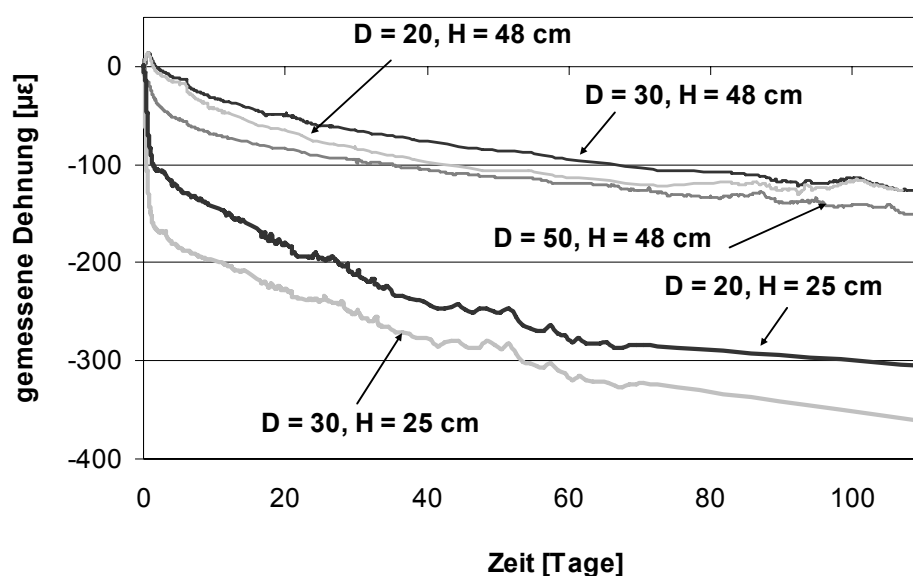


Abbildung 6.36: Dehnungsänderungen, variierende Abmessungen, CEM I (42,5), w/z-Wert 0,50

Der Versuch wurde für zwei Betonkörper mit $H = 48$ cm und $D = 30$ bzw. 50 cm wiederholt. Es wurde ein w/z-Wert von 0,67, CEM I 42,5 ohne Fließmittel verwendet. Abbildung 6.37 zeigt wiederum, dass die Dehnungsänderungen mit zunehmendem Durchmesser größer werden.

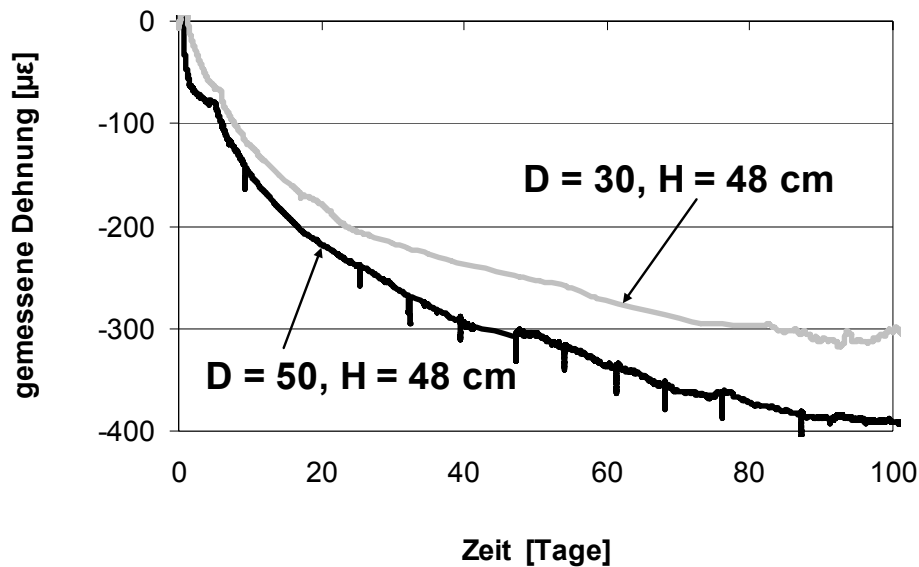


Abbildung 6.37: Dehnungsänderungen, veränderte Abmessungen, CEM I 42,5, w/z: 0,67

Durch die Verwendung eines CEM II/A-S 52,5 R ergeben sich deutlich geringere absolute Dehnungsänderungen, und geringere Schwankungen bei veränderten Durchmessern (Abbildung 6.38).

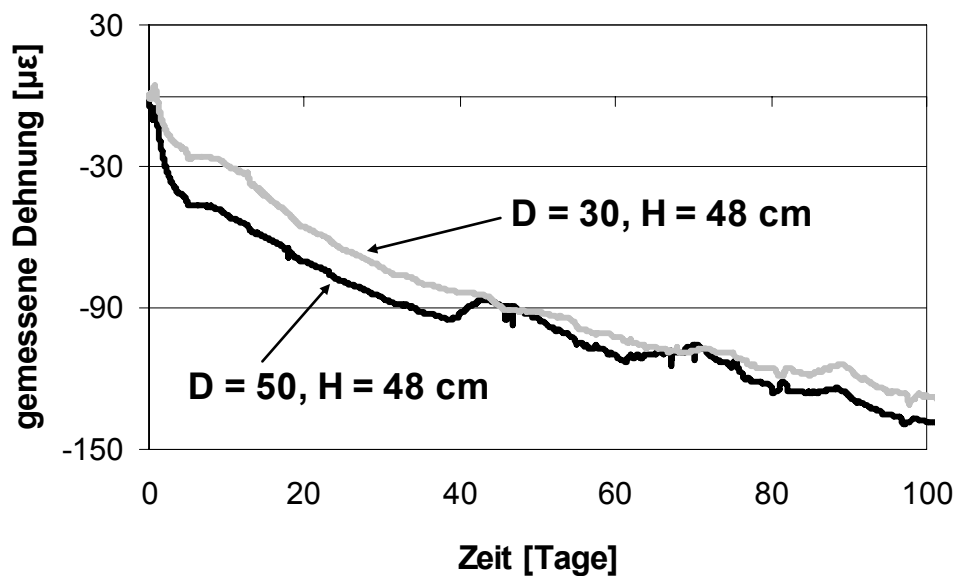


Abbildung 6.38: Dehnungsänderungen, veränderte Abmessungen, CEM II/A-S 52,5 R, w/z: 0,50

6.3.6 Auswirkung variierender Lagerungsbedingungen des Betonkörpers

Aus den vorgenannten Untersuchungen wird deutlich, dass vor allem das Austrocknen des Betons zu Dehnungsänderungen führt. Da z.B. Pfahlbeton in der Regel unter dem Grundwasserspiegel erstellt wird, wurden Versuche zum Einfluss der Dehnungsänderungen bei Wasserlagerung durchgeführt. Es wurden zwei Versuche durchgeführt. Im ersten Versuch wurde der Betonkörper sechs Tage nach Einbetonierung unter Wasser gelagert. Im zweiten Versuch wurde der Betonkörper drei Monaten unter Wasser gelagert, an der Luft getrocknet und wiederum unter Wasser gelagert, um das Dehnungsverhalten unter variierenden Bedingungen zu ermitteln und die reversiblen Anteile des Austrocknens zu ermitteln.

6.3.6.1 Kurzzeitige Lagerung unter Wasser

Die Messergebnisse des direkt nach Betonieren für sechs Tage unter Wasser gelagerten Probenkörpers sind in Abbildung 6.39 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bereits nach zwei Tagen keine Änderung der Dehnungen gemessen werden kann, und sich stabile Messdaten ergeben.

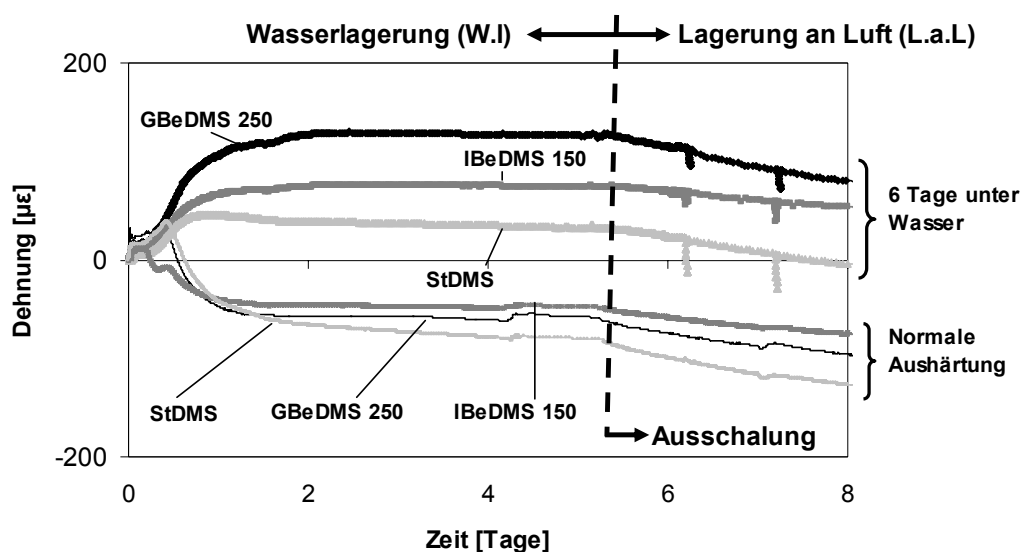


Abbildung 6.39: Vergleich Dehnungsänderung bei Lagerung an Luft und im Wasser in den ersten 7 Tagen

Direkt nach der Entnahme aus dem Wasser, ergeben sich nahezu lineare Dehnungsänderungen aller Messgeber (Abbildung 6.40). Die Änderungsrate ist identisch mit Messergebnissen von Probekörpern, die direkt nach dem Betonieren an der Luft gelagert wurden. Durch die Wasserlagerung ergibt sich eine Nullpunktverschiebung der Messdaten.

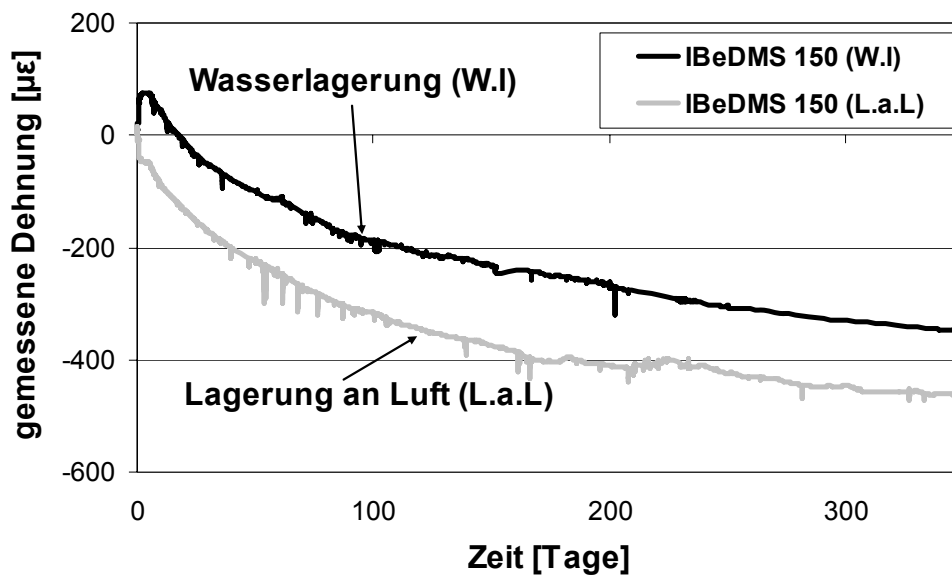


Abbildung 6.40: Vergleich Dehnungsänderung bei Lagerung an Luft und im Wasser in den ersten 400 Tagen

Bei einer Wasserlagerung können somit die absoluten Dehnungsänderungen reduziert werden.

6.3.6.2 Dauerlagerung unter Wasser

Beim zweiten Versuch wurde ein Betonkörper mit einem w/z-Wert von 0,59 für 105 Tage unter Wasser belassen. Es ist deutlich sichtbar, dass in diesem Zeitraum die Messwerte annähernd stabil und konstant sind und sich nur geringste Dehnungsänderungen ergeben (Abbildung 6.41). Nach 105 Tagen wurde der Betonkörper für 35 Tage an der Luft und anschließend wieder im Wasser gelagert. Die während der Wasserlagerung konstanten Messdaten verändern sich bei der Lagerung an Luft deutlich, wie in den bereits beschriebenen Versuchen an der Luft.

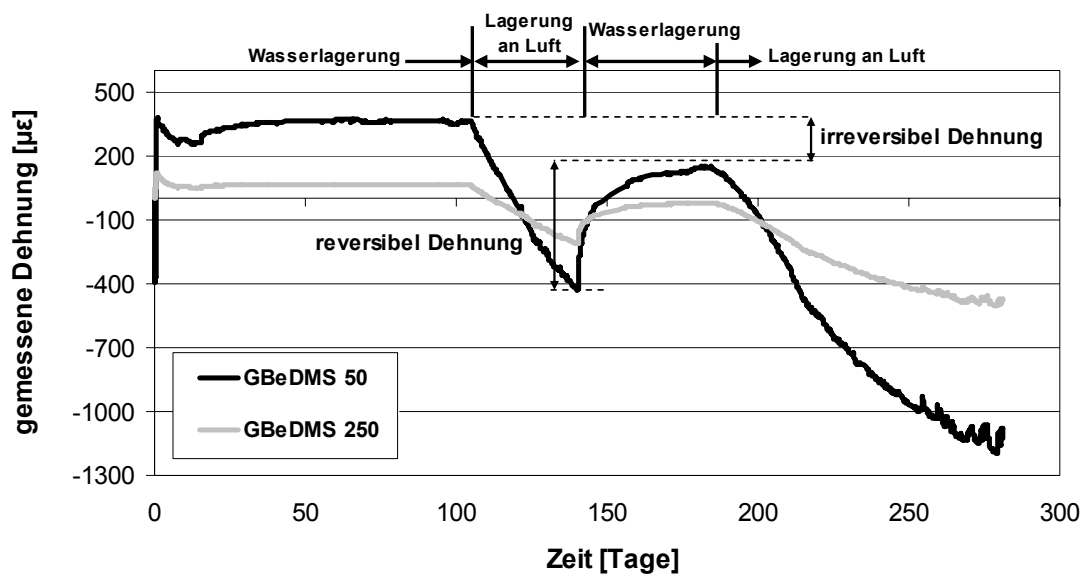


Abbildung 6.41: Dehnungsverlauf, Lagerung unter Wasser

Nach der erneuten Lagerung im Wasser zeigt sich, dass ein großer Teil der gemessenen Dehnungen reversibel ist und wiedergewonnen werden kann. Es ergibt sich jedoch ein irreversibler Dehnungsanteil. Die Dehnungsänderung bei erneuter Luftlagerung ist identisch mit der ersten Luftlagerung. Durch die Wasserlagerung ergeben sich nur geringe Dehnungsänderungen, die bei der Ermittlung von z.B. Pfahlkräften nahezu vernachlässigt werden kann. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass die Messelementgröße einen großen Einfluss auf die ermittelten Dehnungen hat. Mit dem 250 mm langen Messelement wird auch bei der Luftlagerung nur eine kleinere Dehnungsabnahme als mit dem 50 mm langen Dehnungsaufnehmer ermittelt. Mit abnehmender Größe der Messinstrumente weisen diese eine größere Sensitivität auf.

Der Vergleich zwischen den beiden Versuchen (Abbildung 6.42) macht deutlich, dass bei einer Lagerung im Wasser selbst bei unterschiedlichen w/z-Werten von 0,67 bzw. 0,59 dieser nur einen untergeordneten Einfluss auf die Veränderung der Messdaten hat.

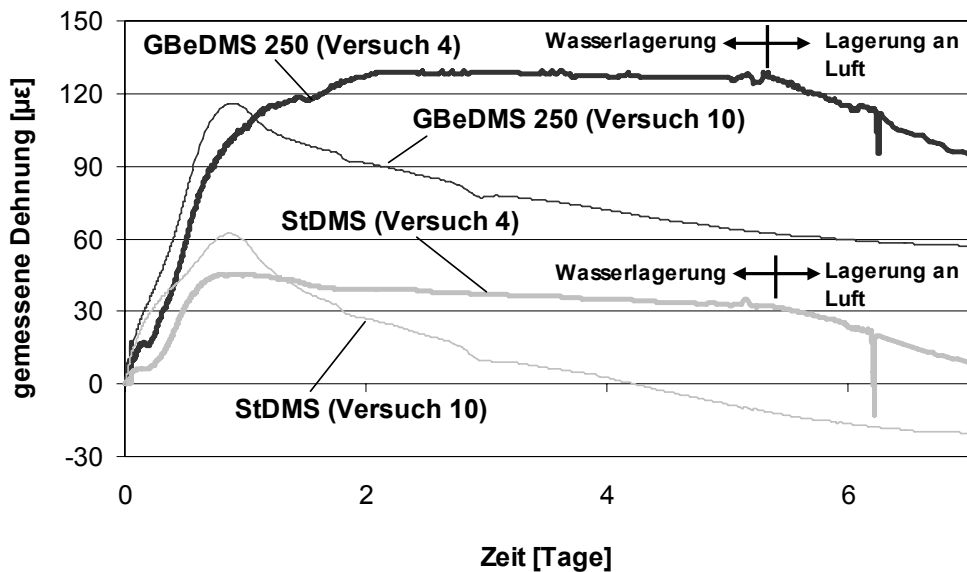


Abbildung 6.42: Vergleich des Dehnungsverlaufs zwischen kurzzeitiger- und Dauerlagerung unter Wasser in den ersten 7 Tagen

6.3.7 Beeinflussung der Messergebnisse der verwendete Messinstrumentgröße

Aus den einzelnen Untersuchungen wird deutlich, dass mit unterschiedlichen Messinstrumenten unterschiedliche Dehnungsänderungen ermittelt werden (siehe Anhang B, Abbildung 14 und Abbildung 15). Tendenziell werden mit kleineren Messinstrumenten größere Dehnungsänderungen als bei größeren Messinstrumenten ermittelt.

Die Ergebnisse unterschiedlicher Messinstrumentengröße sind in Abbildung 6.43 dargestellt.

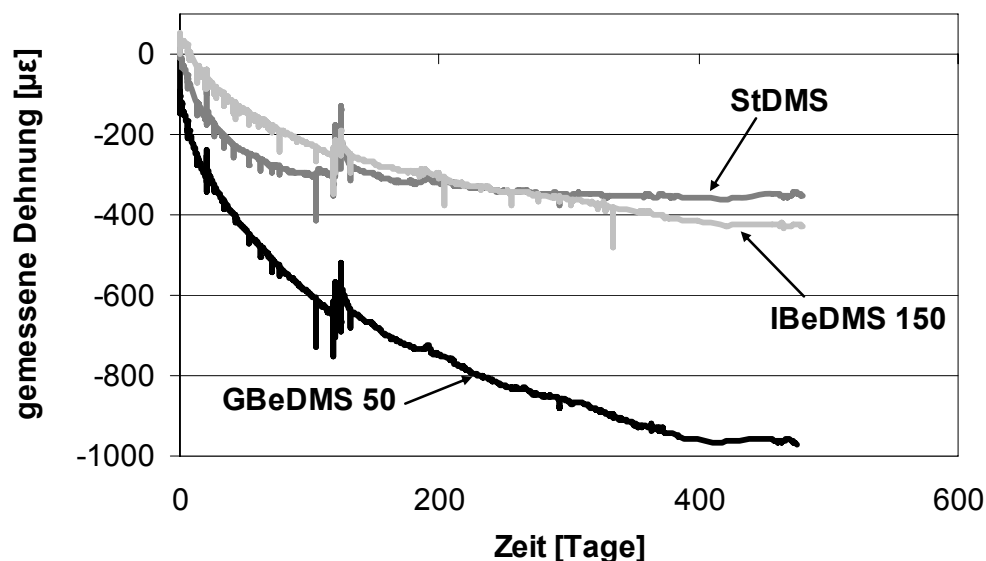


Abbildung 6.43: Vergleich unterschiedlicher Messgeber, Probekörper 2

Die mit dem GBeDMS 50 gemessenen Dehnungen sind im Vergleich zu den anderen Messinstrumenten signifikant größer. Da die Messinstrumente im gleichen Betonkörper eingebaut wurden, müssen sich theoretisch gleiche Dehnungsänderungen ergeben. Da mit zunehmender Größe jedoch die Steifigkeit des Messinstrumentes zunimmt, wird die Dehnung über einen größeren Bereich gemittelt. Deutlich wird dies aus dem Vergleich des Dehnungsgebers mit einer Länge von 15 cm und dem Stahldehnungsgeber. Der Stahldehnungsgeber ist an einem 40 cm langen Bewehrungsstahl appliziert, der durch die Dehnungsänderung im Beton nur gering beeinflusst wird.

Ein Grund für die großen Unterschiede der gemessenen Verformung bei Verwendung unterschiedlich großer Dehnungsaufnehmer ist die Abmessung der Betonkörper. Mit zunehmenden Betonkörperabmessungen werden nur geringere Abweichungen ermittelt. Dies lässt sich aus den Ergebnissen großmaßstäblicher Versuche der Firma GEOKON [1996] nachvollziehen. Die Ergebnisse zeigen, dass die durch die Hydratation des Betons entstehenden Temperaturänderungen die Messergebnisse beeinflussen. Es wird empfohlen, die Messwerte nach der Stabilisierung der Probetemperatur als Nullpunkt zu verwenden.

6.3.8 Verhalten unter Druckbelastung

Bei einer Bauwerksüberwachung ist in erster Linie die innerhalb des Betonkörpers gemessene Spannung von Bedeutung. Bei einer kurzfristigen Belastung (z.B.) einem Pfahltest ist keine Beeinflussung der Messdaten vom Betonabbindeprozess zu erwarten, da die Messung kurzzeitig ist. Da aus den Untersuchungen jedoch die Temperaturabhängigkeit der Messinstrumente deutlich wurde, wurden Belastungsversuche bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. In einem Betonkörper wurden hierzu die zur Simulierung einer höheren Abbindetemperatur eingebauten Wasserschläuche wieder verwendet.

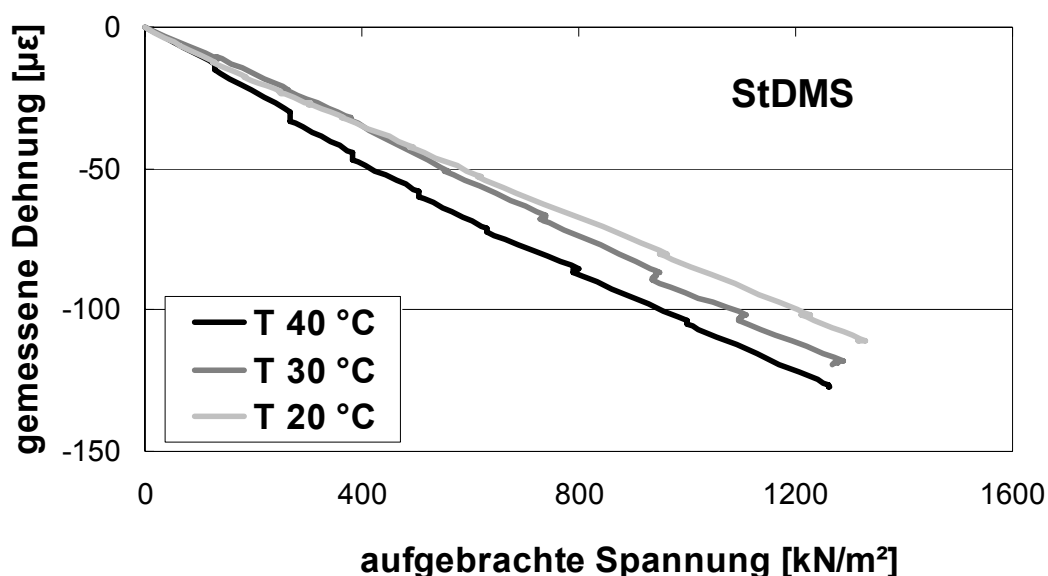


Abbildung 6.44: Dehnungsänderung bei aufgebrachte Spannung in verschiedene Temperatur

Mithilfe der Wasserschläuche wurde die Temperatur schrittweise erhöht. Nachdem einzelne Temperaturen konstant gehalten wurden, und alle Thermoelemente identische Temperaturen aufzeigten, wurde der Betonkörper schrittweise belastet. Dies wurde bei mehreren Temperaturen wiederholt.

Abbildung 6.44 stellt die ermittelten Dehnungsänderungen dar. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit der gemessenen Dehnungsänderungen bei zunehmender Temperatur. Unter gleichen aufgetragenen Spannungen werden größere Dehnungsänderungen ermittelt.

6.4 Einbau von Betondruckmessdosen

Die größere Schwierigkeit bei der Installierung der Betondruckmessdosen ist die Gewährleistung, dass kein Hohlraum im Spalt zwischen Druckmessdose und Beton durch Einbetonierung entsteht, und ein vollständiger Kontakt zwischen Beton und Messdose besteht [CLAYTON et al., 2002; SELLERS, 2003].

6.4.1 Einbau innerhalb der Betonkörper

6.4.1.1 Variation der Abbinde-temperatur

Wie in Abschnitt 6.3.1.2.1 berichtet, konnte mit der eingebauten Druckmessdose keine Ermittlung der vorhandenen Spannungen durchgeführt werden. Da es sich hierbei möglicherweise um einen Einbaufehler gehandelt hat, wurde der nachfolgende Betonkörper ebenfalls mit einer Druckmessdose instrumentiert. Diesem Versuchskörper wurde eine Interfells Betondruckmessdose eingebaut. Sieben Tage nach dem Betonieren erfolgte die Nachspannung, bei der eine größere Menge Nachspannöl verwendet wurde, trotzdem konnte auch hier kein vollständiger Verbund erreicht werden. Den Verlauf der Spannungs-, und Temperaturmessung stellt Abbildung 6.45 dar. Die geringe vorhandene Druckspannung zeigt einen teilweisen Kontakt von Beton und Druckmessdose an. Eine mit externen Lasten aufgetragene zusätzliche Spannung führte zu geringen gemessenen Spannungen. Nachträgliche Temperaturerhöhungen erhöhen jedoch auch die gemessenen Spannungen in der Druckmessdose, sodass die Funktionsfähigkeit der Druckmessdose gegeben ist.

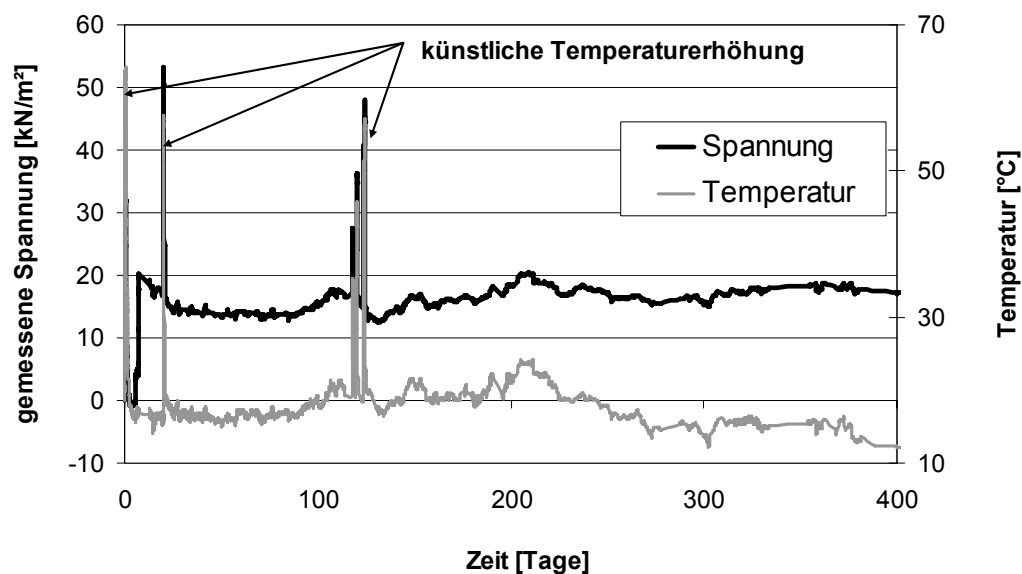


Abbildung 6.45: Temperatur und Spannungsverlauf im Beton (Versuch 2)

6.4.1.2 Veränderung der Betoneigenschaften

Es wurde vermutet, dass sich durch zu starkes Austrocknen des Versuchskörpers kein Kontakt zwischen der Druckmessdose und dem Beton ergibt. Aus diesem Grund wurde eine Druckmessdose in einem Beton mit einem geringeren w/z- Wert eingebaut, sodass durch geringeres Austrocknen ein besserer Kontakt zwischen Druckmessdosen und Betonkörper entstehen kann, das Ergebnis der ermittelten Temperatur und Druckmessung ist in Abbildung 6.46 dargestellt.

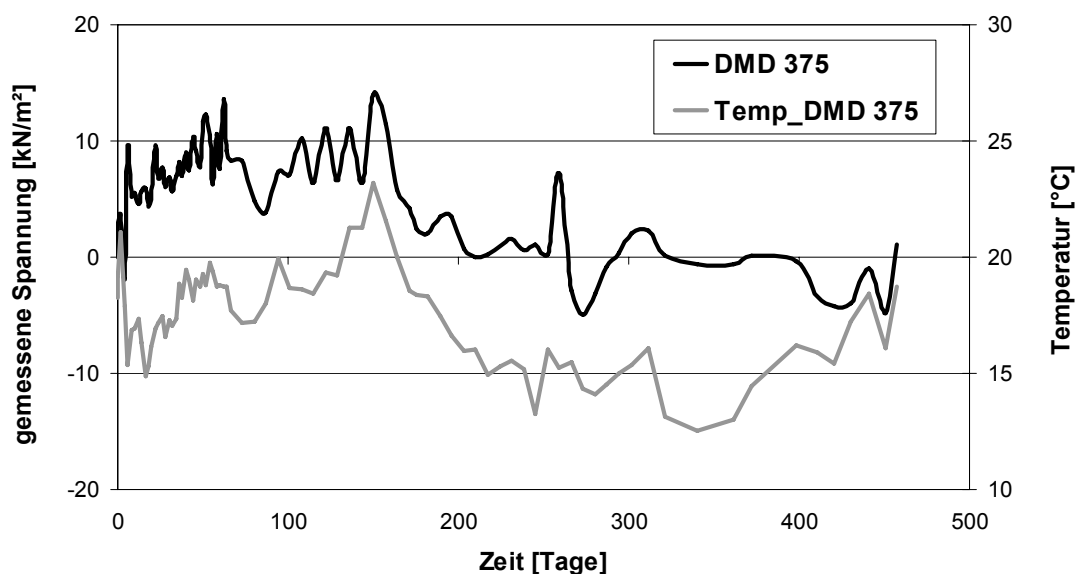


Abbildung 6.46: Temperatur und Spannungsverlauf im Beton (Versuch 3)

Die Messergebnisse zeigen wie bei den Voruntersuchungen eine deutliche Abhängigkeit der gemessenen Spannungen von der Temperatur, ein Kontakt zwischen Betonkörper und

Druckmessdose konnte jedoch trotz Nachspannung erneut nicht erreicht werden. Eine Nachspannung führte immer nur kurzzeitig zu einer Spannungserhöhung, nach einigen Stunden wurde eine identische Spannung wie vor der Nachspannung ermittelt.

Da vermutet wurde, dass es sich bei dem fehlenden Kontakt um den Einfluss der Betoneigenschaften handelt, wurden zahlreiche Veränderungen der Betoneigenschaften und der Einfluss auf die Messergebnisse der Druckmessdosen untersucht. Druckmessdosen wurden in Betonkörpern eingebaut, die unter Wasser gelagert wurden (Abbildung 6.47) oder mit CEM III 32,5 erstellt (Abbildung 6.48). Für alle Versuche wurden ähnliche Ergebnisse ermittelt, mit denen eine Erfassung der real wirkenden Drücke im Beton nicht möglich ist, und die Messergebnisse nicht von externen Belastungen getrennt werden können.

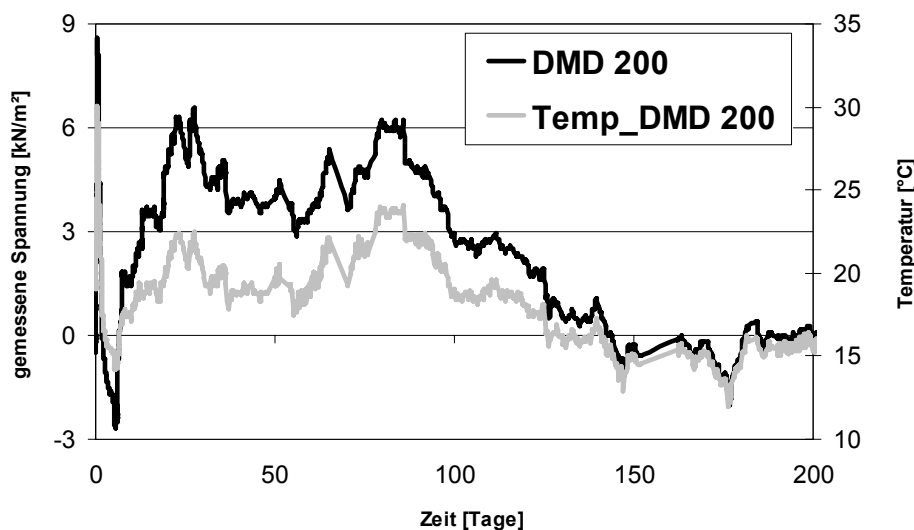


Abbildung 6.47: Gemessene Temperatur und Spannungsverlauf im Beton, Wasserlagerung (Versuch 4)

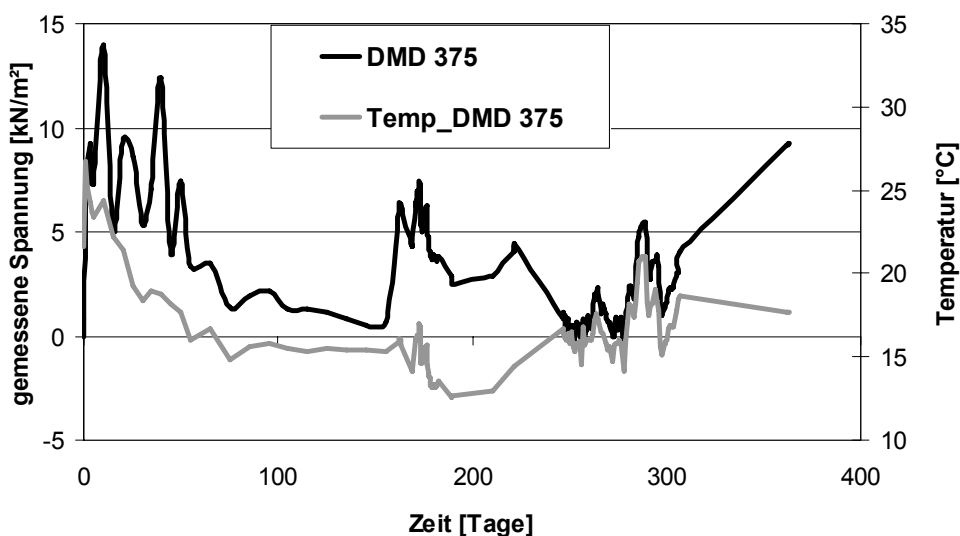


Abbildung 6.48: Gemessene Temperatur und Spannungsverlauf im Beton, CEM III 32,5 (Versuch 5)

6.4.2 Einbau der Betondruckmessdose auf die Betonkörper

Zur weiteren Untersuchung wurden die Druckmessdosen nicht innerhalb der Betonkörper eingebracht, sondern durch spezielle Behandlungsmaßnahmen auf die Betonkörper appliziert. Hierzu wurden die Druckmessdosen nach Fertigstellung des Probekörpers nachträglich auf die Oberfläche in Beton eingebettet.

Die Druckmessdosen wurden auf einer ebenen, 1,5 cm dicken, besonders feinkörnigen Unterfläche aus Beton aufgelegt, und anschließend mit ca. 10 cm Beton überdeckt. Sechs Tage nach dem Einbau der Druckmessdosen erfolgte die Nachspannung. Bei einer anschließend durchgeführten Belastung wurde von der Druckmessdose nur eine vernachlässigbare Spannung gemessen (Abbildung 6.49). Es konnte kein ausreichender Kontakt zwischen Druckmessdose und Beton hergestellt werden.

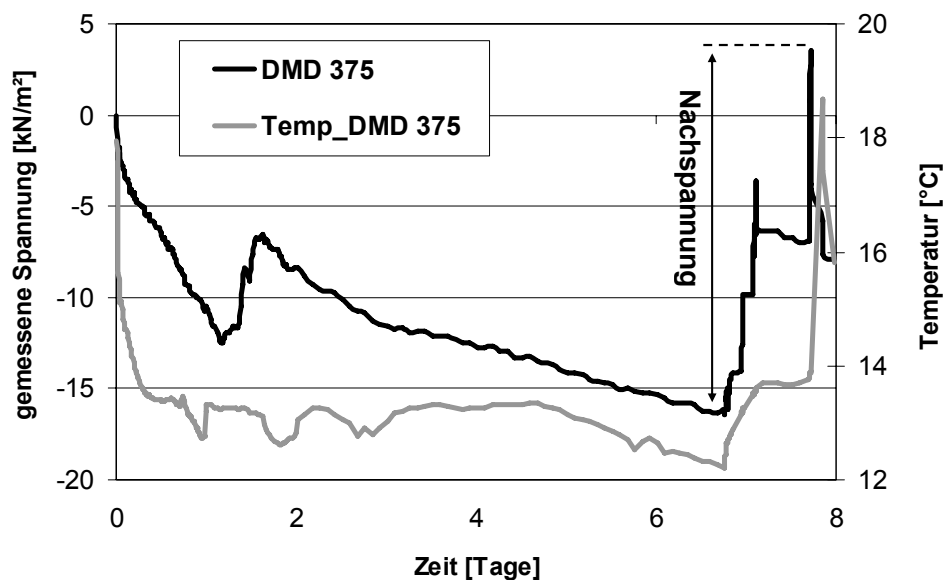


Abbildung 6.49: Temperatur und Spannungsverlauf, Betonierung auf Betonkörper mit Feinbeton

Anschließend wurde eine Druckmessdose mit einer dünnen Ummantelung aus Mauermörtel eingebaut. Der Einbau erfolgte wie mit dem Beton und ist in Abbildung 6.50 - Abbildung 6.52 dargestellt.

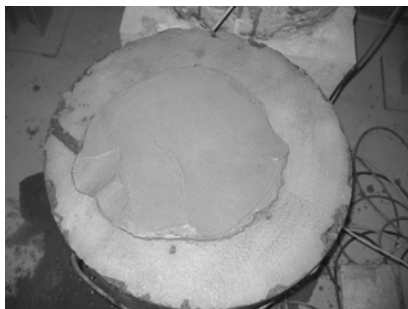


Abbildung 6.50: Mauermörtel als Auflagerungsebene

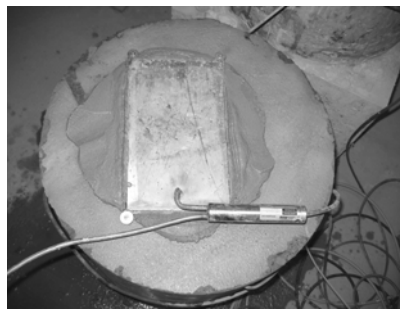


Abbildung 6.51: Auflagerung der Druckmessdose

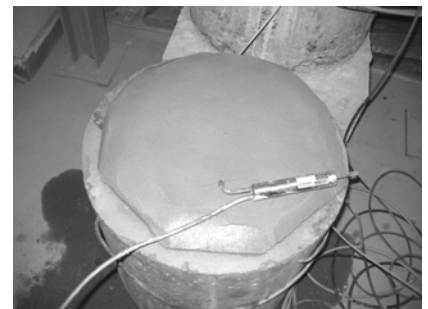


Abbildung 6.52: Mauermörtel auf Druckmessdose

Nach 6 Tagen wurde eine Nachspannung zum Kontaktschluss hergestellt, und der Probenkörper mit bis zu einer Spannung von 600 kPa belastet. Die dabei ermittelte Spannung ist zu gering und beträgt ca. 10% des Sollwertes (siehe Abbildung 6.53).

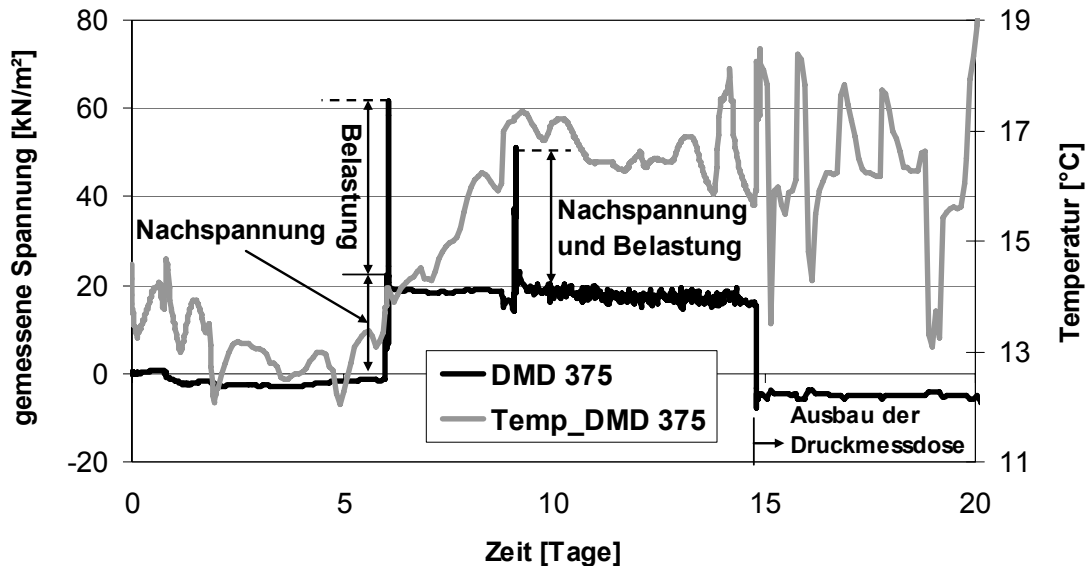


Abbildung 6.53: Temperatur und Spannungsverlauf

Auch bei einem Wiederholungsversuch konnte keine verbesserten Werte erreicht werden (Abbildung 6.54).

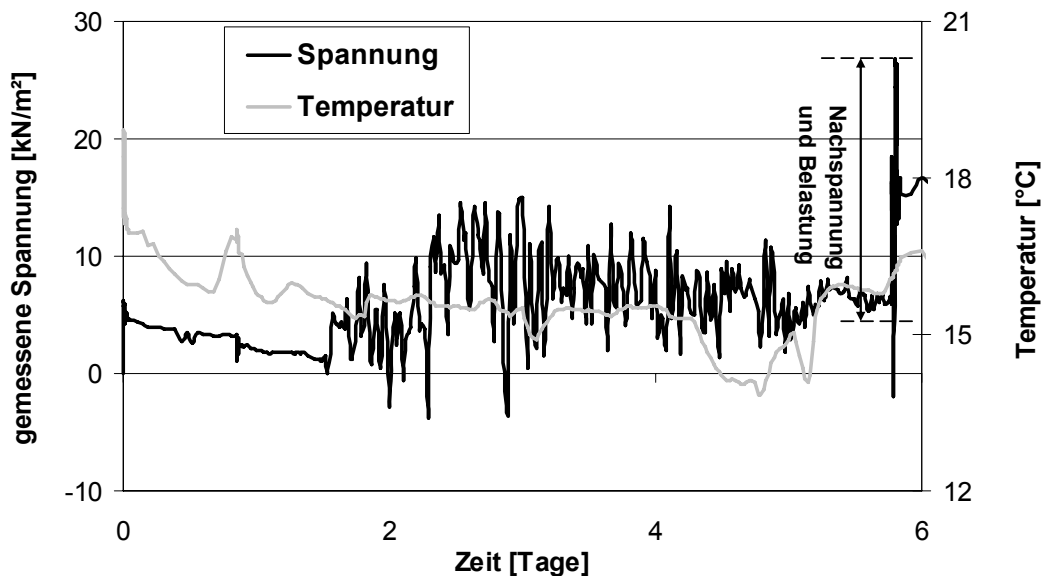


Abbildung 6.54: Temperatur und Spannungsverlauf, Betonierung auf Betonkörper mit Mauermörtel

7 Umsetzung der Erkenntnisse bei konkreten Bauvorhaben

In einem Projekt bei Rotterdam wird ein geokunststoffbewehrter Erdkörper über Mikropfähle erstellt. Zum Nachweis der Dauerhaftigkeit und des Lastabtrages war eine hohe Genauigkeit bei der Messung der in den Pfählen auftretenden Kräfte erforderlich. Als Ergebnis der Laboruntersuchungen wurde empfohlen, die Pfähle nicht unmittelbar nach der Erstellung zu belasten, sondern erst den Einfluss des Abbindeprozesses des Betons zu ermitteln, um die aus dem Abbindeprozess entstehenden Spannungen messtechnisch zu erfassen, und in der Berechnung der auftretenden Lasten separat betrachten zu können [BUSSERT, MEYER, 2005].

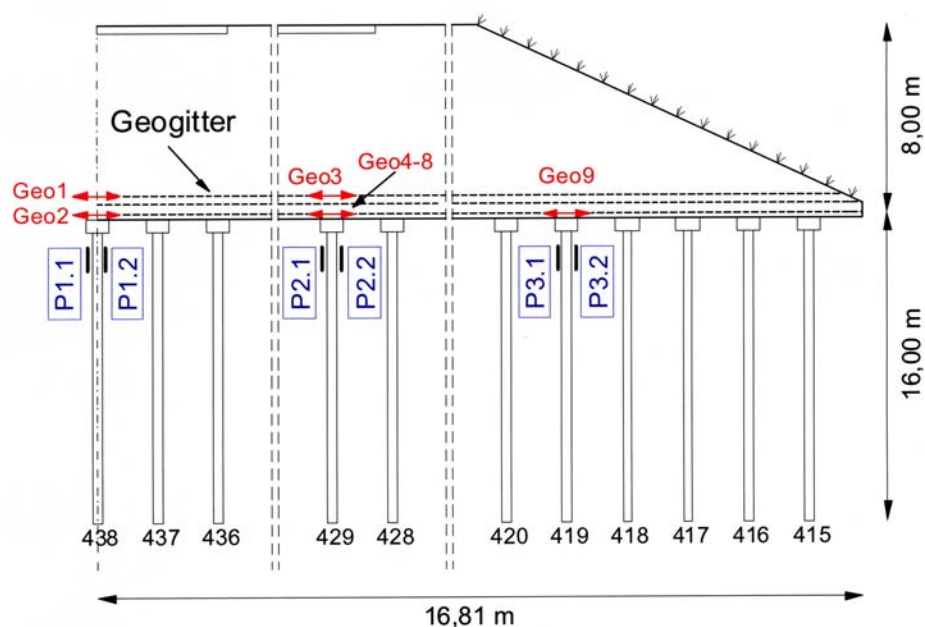


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung der Messpunkte der Pfahlkräfte [BUSSERT, MEYER, 2005]

Zur Überwachung der auftretenden Pfahlkräfte wurden drei Pfähle mit paarweise angeordneten Schwingsaiten- Dehnungsmessstellen instrumentiert, um zusätzlich zur axialen Belastung die Biegemomente in Dammquerrichtung zu erfassen. Die messtechnische Ausstattung für die Messung der Pfahlkraftmessungen ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

Aufgrund der Konstruktionsweise der Pfähle wurden die Pfahldehnungsmessgeber an die Bewehrungskörbe vormontiert und anschließend nach Erstellung des Pfahles in den noch frischen Beton eingedrückt (Abbildung 7.2).



Abbildung 7.2: Einbringen des Bewehrungskorbes eines instrumentierten Pfahls [BUSSERT, MEYER, 2005]

Aufgrund der erforderlichen hohen Qualität der Messdaten, wurde darauf geachtet, dass im Messquerschnitt nach der Pfahlherstellung die gemessenen Dehnungen nicht vom Abbindeprozess des Betons überlagert sind. Es wurde eine Zeitspanne von ca. 2 Monaten eingeplant, in denen der Beton vollständig abbinden kann, und die Messwerte der Pfahldehnungsgeber daher vom Abbindeprozess unbeeinflusst sind. Die kontinuierlich aufgezeichneten Messwerte zeigen einen nahezu konstanten Verlauf, sodass der Beginn der Dammschüttung als Nullpunkt angesetzt werden kann. In Abbildung 7.3 sind die Ergebnisse von Dehnungsmessaufnehmer von Beginn der Pfahlinstallation dargestellt.

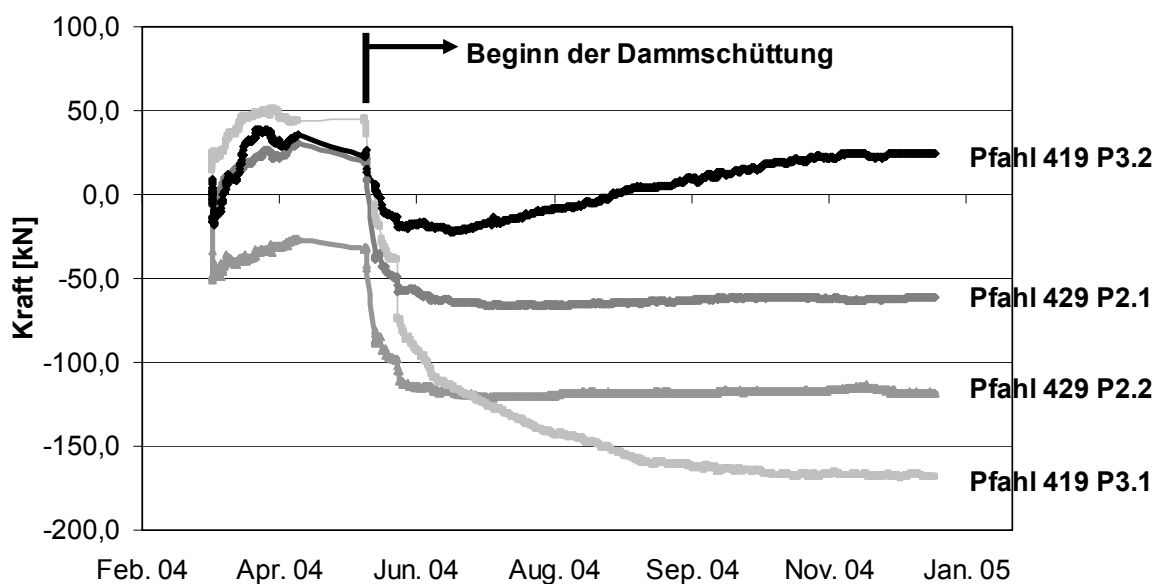


Abbildung 7.3: Unkorrigierte Messergebnisse der Pfahlkräfte [BUSSERT, MEYER, 2005]

Anschließend wurden die Ergebnisse der Dehnungsmessaufnehmer am Anfang der Dammschüttung als Nullwert angenommen und die Ergebnisse vom Abbindeprozess getrennt. Abbildung 7.4 stellt die Ergebnisse ohne den Abbindeprozess dar.

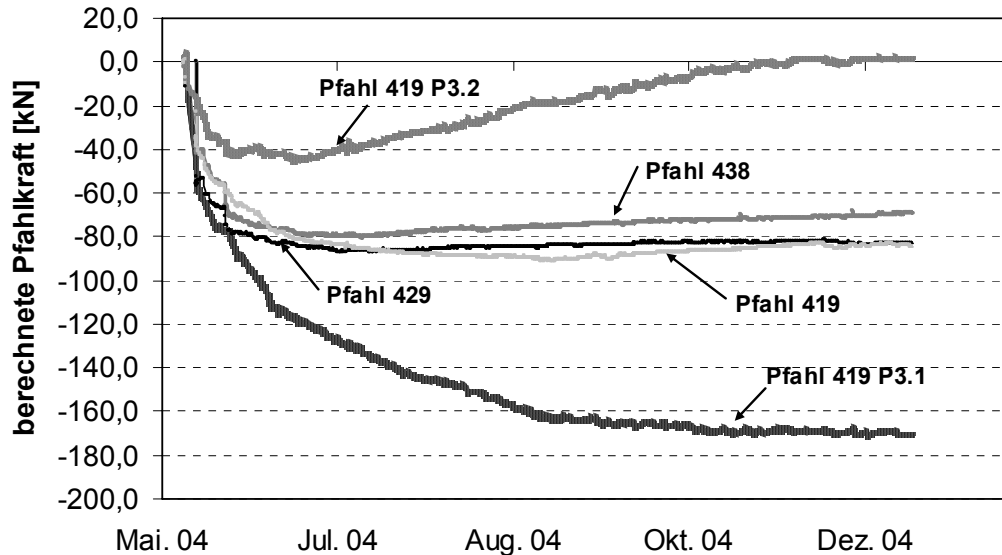


Abbildung 7.4: Korrigierte Messergebnisse der Pfahlkräfte [BUSSERT, MEYER, 2005]

Die Messstellen an den Pfählen 438 und 429 zeigen nahezu die gleichen Kräfte an, deswegen sind hier nur die jeweiligen Mittelwerte der beiden Messgeber dargestellt. Es ergeben sich Kräfte von ca. 70 - 80 kN. Dies entspricht bei dem gewählten Achsmaß der Pfähle dem Überlagerungsdruck unter Berücksichtigung einer Gewölbewirkung. Die Kraft in den Pfählen nimmt auch nach Fertigstellung durch Gewölbebildung und Lastumlagerungen weiter zu und nähert sich erst nach einigen Wochen einem Grenzwert an. Für den Pfahl 419 sind zusätzlich zum Mittelwert die aus den Dehnungen ermittelten Kräfte für jeden Dehnungsgeber separat dargestellt. Dadurch wird deutlich, dass hier eine Interpretation der Daten auf Basis eines Mittelwertes zu falschen Aussagen über den Kraftfluss innerhalb der Konstruktion führt. Die Abweichung der Kräfte auf beiden Seiten verdeutlicht, dass dieser Pfahl auf Biegung beansprucht wird, wobei die neutrale Faser direkt auf der „Zugseite“ liegt. Durch die Stahlfaserbewehrung des Betons liegen die Messwerte im Bereich zulässiger Biegung. Die Biegemomente nehmen auch nach Erstellung des Dammes, signifikant zu. Während sich die Pfähle in der Mitte des Dammes schon kurz nach Fertigstellung einem Grenzwert annähern, ergibt sich für den Pfahl im Böschungsbereich erst nach ca. sechs Monaten ein Ruhezustand ohne Biegemomentenzuwachs.

Wäre der Damm sofort nach Fertigstellung der Pfähle geschüttet worden, wäre durch die sich überlagernden Dehnungen infolge des Abbindeprozesses der Pfähle falsche Kräfte ermittelt worden.

8 Zusammenfassung und Empfehlung

Es ist eine Tatsache, dass die Messung von Spannung im Boden, Gebirge oder anderen Materialien meist schwierigste Instrumentierungsmaßnahmen mit sich bringt. Da die Änderung der Parameter von Druckmessdosen für jedes Projekt fast unmöglich ist, ist es wichtig, dass der Anwender weiß, wie die Standarddruckmessdosen zum Erfassen best möglicher Ergebnisse unter verschiedenen Bedingungen zu verwenden sind.

Da die Druckmessdosen nur relative Messwerte erfassen und die Laborkalibrierung im Wasser lediglich eine Methode zur Prüfung der Konstruktion und Funktion ist, sollte der Benutzer eine Kalibrierung mittels real Material, in dem die Messdose eingebaut wird, durchführen.

Verschiedene Parameter können die Spannungsmessungen mittels Messgebern beeinflussen [WEILER und KULHAWY 1982, DUNNICLIFF 1993], einige von diesen Parameter wurden mittels Laborversuchen kontrolliert.

In Kapitel 4 wurde die Beeinflussung der Auflagerungsbedingungen bei Laborversuchen ermittelt. Ein größeres Problem bei Laborversuchen mit Druckmessdosen ist die Spannungsverteilung im Boden des Versuchsbehälters. Damit die einheitliche Spannungsverteilung im Boden gewährleistet werden kann, müssen die Messdosen in entsprechenden Tiefenlagen eingebaut werden. In geringen Tiefenlagen ist die Spannungskonzentration höher, und in größeren Tiefenlagen sollte der Druckverlust auf Grund der Reibung berücksichtigt werden.

Die Totalspannungsmessung im Feinkornboden ist genauer, da das Verhältnis Fläche der Messdose zu Korngröße sehr hoch ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass beim Einbau der Messdosen im Boden ein entsprechendes Bodenmaterial mit kleiner Korngröße (z.B. feiner Sand) verwendet werden muss, um die einheitliche Spannungsübertragung auf die Fläche der Messdose zu garantieren. Jedoch muss darauf geachtet werden, dass das Ummantelungsmaterial keinen sehr viel größeren oder kleineren Elastizitätsmodul im Vergleich zum umgebenden Boden hat, um Effekte weicher oder steifer Einschlüsse zu vermeiden.

Generell liefern die größeren Druckmessdosen bessere Werte von entstehenden Bodenspannungen als die kleinen. Sollen trotzdem kleine Druckmessdosen im Feld verwendet werden, ist auf einen sehr sorgfältigen Einbau zu achten.

Die Untersuchung des Einflusses der Größe der Druckmessdosen auf die Messergebnisse zeigt, dass unter gleichen Einbaubedingungen sowohl in Tonmehl als auch in feinem Sand (als Ummantelung) mit zunehmender Größe der Druckmessdosen die gemessenen Spannungen zunehmen. Diese Erkenntnisse widersprechend gänzlich den Aussagen von

DUNNICLIFF (1993). Mann kann diese so interpretieren, dass mit größeren Druckmessdosen die Spannungen realitätsnaher gemessen werden.

Bei diesen Versuchen ist zwar keine deutliche Änderung der gemessenen Spannungen auf Grund von Neigungsänderungen (infolge nicht horizontalen Einbaus) festzustellen. Beim Einbau der Druckmessdose sollte die Lage jedoch am besten mit einer Wasserwaage kontrolliert werden.

In den untersuchten Spannungsbereichen wurde kein deutlicher Einfluss der Temperaturänderung registriert. Dieses sollte in Bereichen größerer Spannungen jedoch noch kontrolliert werden.

Die Untersuchungen zeigten, je kleiner der Abstand zwischen den Druckmessdosen wird, desto geringer werden die gemessenen Spannungen je Druckmessdose.

Durch die Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass vor allem die Steifigkeit der Druckmessdose und der Ummantelung einen signifikanten Einfluss auf die ermittelte Spannung haben kann. Es wurde festgestellt, dass die Eigenschaften der Ummantelung zu einer Kurvenfunktion führen, bei der unterschiedliche Abweichungen vom Sollwert ermittelt wurden (Kapitel 5). Zur Erfassung der Abweichungen der Messwerte durch das Messinstrument und die Ummantelung wurde daher eine theoretische Betrachtung vorgenommen, mit der die Messwerte bei bekannter Ummantelung den wirkenden Spannungen angepasst werden können. Die Versuche in Kapitel 5 zur Erforschung der Beeinflussung des Ummantelungsmaterials beim Einbau der Druckmessdose wurden in verschiedenem Bodenmaterial, mit unterschiedlichen Ummantelungen und mit verschiedener Größe der Druckmessdosen durchgeführt. Mit den Ergebnissen wurde nachgewiesen, dass die eingeführte Gleichung (Gleichung 5.4) zur Erfassung besserer Ergebnisse beim Einsatz von Druckmessdose führt. Diese wurde auch im Feldversuche beobachtet.

Aus den Ergebnissen leiten sich einige Hinweise zum Einbau der Druckmessdosen in der Baupraxis ab. Zur Optimierung der Messwerte kann die theoretisch ermittelte Gleichung herangezogen werden. Zusätzlich ergeben sich folgende zu beachtende Randbedingungen:

- In der Baupraxis sollten Druckmessdosen mit einem Durchmesser von mindestens $D = 12 \text{ cm}$ verwendet werden
- Als Ummantelung werden nur nichtbindige Böden empfohlen
- Die Ummantelung mit feinem Sand ($0 - 2 \text{ mm}$) soll mindestens 2 cm dick sein
- Die Ummantlung soll eine geringere Steifigkeit als umgebende Boden aufweisen
- Der Ummantelungsdurchmesser soll mindestens 60 cm oder $D_U \geq 3 \times D_D$ betragen
- Tonmehl ist keine entsprechendes Ummantelungsmaterial, weil es über die Zeit den Wassergehalt verliert und dadurch härter wird bzw. der Elastizitätsmodul niedriger und sich infolge dessen die gemessene Spannung vergrößern.

Beim Einbau der Messelemente (Druckmessdosen, Dehnungsmessstreifen und Thermistoren) im Beton wurden die Temperatur-, Dehnungs- und Spannungsverläufe aufgezeichnet, und die Auswirkung der verschiedenen Parameter ermittelt. Die Maximaltemperatur der Betonproben auf Grund des Abbindeprozesses sind in Abbildung 16 Anhang B dargestellt.

Die Dehnungs- und Spannungsverläufe im Betonkörper während des Abbindeprozesses und nach der Aushärtung wurden verglichen. Da der Kontakt zwischen Beton und Druckmessdose mehrfach abbriss, wurden entsprechend nachgespannt. Bei den anderen Versuchen konnte kein richtiger Kontakt hergestellt werden.

In dieser Untersuchung wurden 5 verschiedene Modelle des Dehnungsmessstreifens (DMS) verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Größe und Steifigkeit der DMS eine wichtige Rolle bei Dehnungsmessungen spielen. Mit zunehmender Steifigkeit oder Länge des Dehnungsmessaufnehmers nehmen die gemessenen Dehnungen ab.

Die Verwendung unterschiedlicher Zementarten im Beton ergeben, dass sich mit zunehmendem Hüttensandanteil die Reaktions- und Erhärtungsgeschwindigkeit bei größerer Nacherhärtung reduziert. Während des Abbindeprozesses wurde die höchste Maximaltemperatur und die größte Dehnungsänderung für CEM I 42,5 (geringster Hüttensandanteil), und die geringste Maximaltemperatur und Dehnungsänderung bei CEM III 32,5 (höchster Hüttensandanteil) gemessen.

Der Wasserzementwert hat eine große Auswirkung auf die Messergebnisse. Bei zunehmendem w/z-Wert ergibt sich eine höhere Maximaltemperatur und Dehnungsänderung durch den Abbindeprozess und durch Austrocknung.

Die künstliche Temperaturerhöhung durch den Abbindeprozess des Betons zeigt keinen sichtbaren Einfluss auf die Dehnungsänderung des Betonkörpers, im Gegensatz dazu hat die Veränderung der Umgebungstemperatur enorme Auswirkung auf den Abbindeprozess des Betons. Besonders wenn die Temperatur unter 0° C fällt, wird die Abbindeprozess stark beeinflusst, und die gemessenen Dehnungsänderungen nehmen stark ab.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Abmessung des Betonkörpers die gemessenen Dehnungen abnehmen, und bei Lagerung des Betonkörpers unter Wasser bleiben die Dehnungen nach dem Ansteigen durch die Hydratationswärme konstant solange die Betonprobe unter Wasser liegt. Nach der Entnahme aus dem Wasser ergibt sich eine nahe zu lineare Dehnungsänderung, bei erneuter Lagerung unter Wasser tritt ein irreversibler Dehnungsanteil auf.

Es ist aus den vorhergehenden Ermittlungen klar, dass die Messung der Spannung im Beton viele Schwierigkeiten mit sich bringt. Dehnungsmessaufnehmer werden jedoch weiter verwendet, trotz der Ungenauigkeiten bei der Umrechnung von Dehnungen zu Spannungen.

Die unmittelbare Messung der Spannung mittels Druckmessdosen erfordert sehr sorgfältige Einbaumethoden, um den Kontakt zwischen Messdose und Beton zu sichern. Oftmals sind die Thermaleffekte infolge einer induzierten Druckmessdose so groß, dass sie lastinduzierten Spannungen überlagern. Es sind noch viele Untersuchungen notwendig, um diese Effekte zu quantifizieren und damit in Zukunft bei Messungen berücksichtigen zu können.

Speziell beim Einbau im Beton kommt es zu komplexen, bis heute nicht vollständig verstandenen Prozessen und Effekten. So werden auch immer wieder negative Druckwerte an den Messaufnehmern nach dem Aushärten und Abkühlen des Betons beobachtet. In diesem Fall mag das einhergehen mit einer adhäsiven Verbindung der Dosenoberfläche mit dem Beton. Das Öl zieht sich dabei stärker zusammen als der Beton, die Oberfläche der Dose kann unter Umständen etwas am Beton kleben und daher nicht nachgeben, was dann zu einem leichten Unterdruck im Inneren der Dose führen kann.

Leider ist nun wie bereits eingangs erwähnt, die Interpretation der so erhaltenen Messwerte äußerst schwierig und komplex. Auf jeden Fall aber sollte ein kraftschlüssiger Kontakt zwischen Dose und Beton hergestellt werden, was durch das Ansteigen des Messwertes während des Nachspannens angezeigt wird. Zur Herstellung eines ausreichenden Kontaktes muss eine ausreichende Ölmenge über ein Nachspannröhrchen zu Verfügung stehen, um einen kraftschlüssigen Kontakt zwischen Dose und Beton herstellen zu können.

Man kann davon ausgehen, dass die Abmessungen des verwendeten Betonkörpers sehr klein sind aber generell kann gesagt werden, dass es wegen der erforderlichen Abmessungen sehr schwierig ist, über geeignete Bedingungen für einen Labortest zu verfügen.

Bei kleinen Betonkörpern, wie den verwendeten, besteht jedoch die große Gefahr, dass durch das Aufweiten der Dose beim Nachspannen Risse auftreten und der Betonkörper dadurch aufgeweitet wird. Dies würde die Messergebnisse natürlich erheblich verfälschen.

Wo Druckmessdosen verwendet werden, kann es nützlich sein, einen oder mehrere danebenliegende Dehnungsmessaufnehmer einzubauen. Gute Übereinstimmung zwischen Dehnungsmessaufnehmer und Druckmessdosen können beobachtet werden, aber üblicherweise nur wenn ein gewisser Zeitraum nach der Einbetonierung abgelaufen ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass wegen großer Temperaturänderung infolge Hydratation in jungem Beton die Ergebnisse der Dehnungsmessaufnehmern nicht so zuverlässig sind, wie nach dem Ende des Abbindeprozesses. Dabei ist zu beobachten, dass verschiedene Typen von Dehnungsmessaufnehmern eine unterschiedliche Temperaturempfindlichkeit aufweisen. Aus diesem Grund sollte nach Abklingen der Hydratation und Stabilisierung der Temperatur ein Nullabgleich der Messgeber vorgenommen werden. Nach diesem Prinzip wurden die Feldversuche aus Kapitel 7 ausgewertet. Die Auswertung kommt zu plausiblen Ergebnissen.

Ein Grund für die großen Unterschiede in der gemessenen Verformung bei Verwendung unterschiedlicher Ausführungen der Dehnungsaufnehmer ist die Abmessung der Betonkörper. Zwei Modelle von Verwendete DMS (GBeDMS 155 und IBeDMS 150) haben Genauigkeit von $1 \mu\epsilon$, und Zwei Modelle (GBeDMS 55 und GBeDMS 250) haben Genauigkeit von $0,4 \mu\epsilon$, die gemessene Dehnungen bei erste zwei DMS waren immer größer als andere Modelle. Bei der großmaßstäblichen Anwendung sollte die Abweichung nicht so groß sein. Dies lässt sich aus den Ergebnissen der großmaßstäblichen Anwendung der Firma GEOKON gut nachvollziehen.

Eine deutliche Intensivierung der Forschung in diesem Bereich unter in situ Bedingungen ist erforderlich um die beeinflussenden Parameter zu ermitteln und realistische Spannungen zu ermitteln. Da eine gute Übereinstimmung gemessener Dehnungen mit den Spannungen ermittelt werden konnte, ist es sinnvoll, Dehnungsaufnehmer in der Nähe der Druckmessdosen zu installieren, um aus den Dehnungen die wirkenden Spannungen zu ermitteln.

9 Summary

Measuring instruments are installed to assessment the load transfer in the structure and the stress distribution in subsurface on significant points for verification of theoretical load transfer. Despite attention to all well-known parameters by instrumentation control within the scope of the monitoring method of structures, serious errors of measurements, hardly interpretable results of measurement or probable loss of measuring instruments (Pressure cells, strain gauges) have been again and again occurred.

In the frame of this work, the affecting factors on the results of geotechnical measuring instruments have been researched. The investigation has been carried out in two surrounding environment: sand and concrete.

The tests have been implemented in two main parts in sand. In the first part of the work, effecting of several factors on the results of pressure cells in sand have been studied, such as aspect ratio (ratio of cell diameter to thickness), ratio of surrounding environmental material stiffness to cell stiffness (soft- and hard-inclusion), temperature changes, the size of cell, orientation of cell and proximity of other embedded cells.

Through the first series of tests in sand it has been found out, that the soft- and hard-inclusion is an important influence parameter on the results of pressure cells in soil. Therefore, in the next test series, it has been tried to examine the above investigated effects in detail with use of the different casing materials. Some recommendations have been presented to improve the results through the usage of the casing materials in the installation of the pressure cells. As a result of this investigation an analytical equation has been developed in order to optimize the application of casing material for installation of pressure cells. Thereby, an improvement in the accuracy of measurement of the pressure cells has been achieved. The equation was recontrolled through a number of laboratory tests in media with different grain size and field test.

In the second part of the work, the effects of surrounding and environment conditions on the progress of temperature, strain and stress during the curing in the concrete by means of thermistors, strain gauges and concrete pressure cells have been studied. For this purpose, altogether 18 cylindrical concrete samples have been produced. The aim was the determination of the influence of the surrounding environment conditions on the results of the measurement. Both the effect of concrete composition through variation of the water-cement ratio (w/c) and cement type, and the placing conditions (short-term and long-term immersion in water) on the curing process of concrete have been investigated. Furthermore the effect of sample mass and environment temperature as well as artificial increase of temperature on the curing process of concrete have been studied.

The concrete pressure cells have been repeatedly in concrete samples installed to specify the reasons of separation of contact between concrete and pressure pad by installation of

concrete pressure cells. The concrete samples are loaded over the time through external forces. The variations of measured pressures under load over the time have been studied.

In addition, the results of different strain gauges (different production types, size and accuracy) have been compared to each other.

10 Literaturverzeichnis

ALBERRO, J., BORBÓN, J.Z. (1985): „Testing of Earth pressure Cells“, Contribution to the 15th ICOLD, Vol. 11, Lausanne

ALMUDAIHEEM, J. A. und HANSEN, W. (1987): „Effect of Specimen Size and Shape on Drying Shrinkage of Concrete“, ACI Materials Journal, Vol. 84, No. 2, pp. 130-135

BAILEY, A. C., NICHOLS, T. A., JOHNSON, C. E. (1988): „Soil Stress State Determination under Wheel Loads“, Transactions of the American Society of Agricultural Engineering (ASAE), Vol. 31, No. 5, pp. 1309-1314

BAYER, E. (2003): „Risse im Beton, Zement-Merkblatt B18“, Zement-Merkblatt Betontechnik, Bauberatung Zement, Verlag: Bauberatung Zement, Köln

BECKER, A., WERNER, D. (1995): „Bestimmung der Gebirgsspannung mit der Bohrloch-Schlitzsonde“, Felsbau 13, pp.134-138

BK 1(2001): „Beton Kalender“, Verlag Ernst & Sohn

BLOCK, W. A., JOHNSON, C. E., BAILEY, A. C., BURT, E.C., RAPER, R. L. (1995): „Soil Stress Measurement under Rigid Wheel Loading“, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, , Vol. 32, No. 6, pp. 269A-269A(1)

BLUNDEN, B. G., MCBRIDE, R. A., DANIEL, H., and Blackwell, P. S. (1994): „Compaction of an Earthy Sand by Rubber Tracked and Tyred Vehicles“. Australian Journal of Soil Research 32, pp. 1095-1108

BRUZZI, D., ZATTONI, A., PEZZETTI, G. (1999): „Pressure Cells: How to Obtain Better Results“, Field Measurements in Geomechanics

BUSSERT F., MEYER, N. (2005): „Dauerhafte Messung der Geokunststoff-Pfahlkraft-Interaktion eines Bahndammes“, 9. Informations- und Vortragstagung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, München Februar 2005, Sonderheft der DGGT

CARLSON, R., PRITZ, D. (1952): „Development of a Device for the Direct Measurement of Compressive Stress“, Journal of the American Concrete Institute, pp. 201-215

CHOQUET, P., JUNEAU, F., DEBREUILLE, P. J., BESSETE, J. (1999): „Reliability, Long-term Stability and Gage Performance of Vibrating Wire Sensors with Reference to Case Histories“, Field Measurements in Geomechanics

CLAYTON, C. R. I., VAN DER BERG, J. P., HEYMANN, G., BICA, A. V. D. und HOPE, V. S. (2002): „The Performance of Pressure Cells for Sprayed Concrete Tunnel Linings“, Geotechnique, Vol. 52, No. 2, pp. 107-115

DAIGLE, L., ZHAO, J. Q. (2003): „Assessing Temperature Effects on Earth Pressure“, Research Report, Institute for Research in Construction, pp. 31, February 17, RR-131

DELARRARD, F., ACKER, P., LEROY, R. (1994): „Shrinkage and Thermal Properties“

DIBIAGIO, E. (1977): „Field Instrumentation-A Geotechnical Tool“, Norwegian Geotechnical Institute pub., No. 115, pp. 29-40

DUNNCLIFF, J. (1993): „Geotechnical Instrumentation for monitoring field performance“, John Wiley & Sons, London

DUNNICLIFF, J. (1997): „Temperature Sensitivity of Earth Pressure Cells“, Geotechnical News, Vol. 15, No. 1, p. 42

E DIN 1054 (2003): Baugrund Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau

EIERLE, B., SCHIKORA, K. (2000): „Bodenplatten unter frühem Temperaturzwang - Rechenmodelle und Tragverhalten“, Bauingenieur 75, Heft 10/2000

FECKER, E. (2004): „Kraft- und Spannungsmessungen“, Geotechnisches Ingenieurbüro, Prof. Fecker & Partner GmbH, Geotechnische Messgeräte, Kapitel 3

FÉLIO, G. Y., UND BAUER, G. E. (1986): „Factors Affecting the Performance of a Pneumatic Earth Pressure Cell“, Geotechnical Testing Journal, American Society for Testing and Materials.

FILZ, G. M. und BRANDON, T. L. (1994): „Static and Dynamic Measurement Using Embedded Earth Pressure Cells“, Transportation Research Record, 1432, pp. 68-95

FILZ, G.M. und DUNCAN, J.M. (1993): „Pressure Cell Drift“, Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 16, No. 4, pp. 432-441

FRANZ, G. (1958): „Unmittelbare Spannungsmessung in Beton und Bohrloch“, Der Bauingenieur, Vol. 33, pp. 190 - 195

GLÖTZL (1998): Firmenprospekt GLÖTZL- Ventilgeber, Glötzl Baumesstechnik, Rheinstetten

GLÖTZL (2001): Firmenprospekt GLÖTZL- Ventilgeber, Betonspannung Funktionsprinzip, Glötzl Baumesstechnik, Produktkatalog, Prospektverzeichnis

- GRÜBL, P., WEIGLER, H., KARL, S. (2001): „Beton; Arten, Herstellung und Eigenschaften“, Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau, Verlag Ernst & Sohn
- HADALA, P. F. (1967): „The Effect of Placement Method on the Response of Soil Stress Gages“, in Proceeding of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, The University of New Mexico Press, Albuquerque, NM, pp. 255-263
- HANNA, T. H. (1985): „Field Instrumentation in Geotechnical Engineering“, Series on Rock and Soil Mechanics, Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, Germany, Vol. 10
- HANSEN, W. (1987): „Constitutive Model for Predicting Ultimate Drying Shrinkage of Concrete“, Journal of the American Ceramics Society, Vol. 70, pp. 329-332.
- HARRIS, H.D. und BAKKER, D.M. (1994): „A Soil Stress Transducer for Measuring In Situ Soil Stresses“, Soil and Tillage Research, Vol. 29, pp. 35-48
- HEUSERMANN, S., EICKEMEIER, R. (2004): „Finite-Elemente-Analysen zur Ermittlung der Steifigkeit hydraulischer Gebirgsspannungsgeber“, Messung in der Geotechnik 2004, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 77, pp. 281-292
- HOLT, E. (2001): „Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete“, VTT Publications 446, Technical Research centre of Finland (VTT), Espoo
- HORN, R., BLACKWELL, P. S., WHITE, R. (1989): „The Effect of Speed of Wheeling on Soil Stresses, Rut Depth, and Soil Physical Properties in an Ameliorated Transitional red-brown Earth“, Soil and Tillage Research, Vol. 13, pp. 353-364
- HUCH, T. KAUTHER, R., SCHALLERT, M. (2001): „Bau der Doppelsparschleuse Hohenwarte – Messkonzeption, Erfahrungen und bisherige Ergebnisse“, in: 1. Siegener Symposium: Messtechnik im Erd- und Grundbau
- HUGGENBERGER, A. U. (1951): „Talsperren- Meßtechnik: Meßverfahren, Instrumente und Apparate für die Prüfung der Bauwerke in Massenbeton“, Springer Verlag
- HVORSLEV, M. J. (1976): „The Changeable Interaction Between Soils and Pressure Cells: Tests and Reviews at the Waterways Experiment Station“, Vicksburg, MO: US Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report No. S-76-7
- INTERFELS (1994): Interfels Nachrichten Nr. 11, Druckkissen und Druckmessdosen, Bad Bentheim

JUSTNES, H., CLEMMENS, F., DEPUYDT, P., VAN GEMERT, D. und SELLEVOLD, E. J. (2000): „Correlating the Deviation Point between External and Total Chemical Shrinkage with Setting Time and Other Characteristics of Hydrating Cement Paste“, Shrinkage 2000: Proc. of the Int. RILEM Workshop, Baroghel-Bouny, Paris, Vol. 1, pp. 57 - 73.

KELLER, H. (1967): „Druckmessung in Böden verschiedener Lagerungsdichte“, Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln

KIRBY, J. M., BLUNDEN, B. G., TREIN, C. R. (1997): „Simulating Soil Deformation Using a Critical-State Model: II. Soil Compaction Beneath Tyres and Tracks“, European Journal of Soil Science; Vol. 48, pp. 59-70

KIRBY, J.M. (1998): „Soil Stress Measurement: Part I. Transducer in a Uniform Stress Field“, Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 72, No. 2, pp. 151-160

KÜGLER, M., JUNG, R. (2001): „Geotechnische Messungen an der neuen Elbebrücke Tangermünde“, in: 1. Siegerner Symposium. Messtechnik im Erd- und Grundbau

Laboratorium für den konstruktiven Ingenieurbau der TU München (1990): Bericht über Messung in Tunnelinnenschalen (U-Bahn München); Teil a: Vorversuch an einem Block, Schlussbericht, München

LEUSSINK, H., BLINDE, A., ABEL, P. G. (1966): „Versuche über die Sohldruckverteilung unter starren Gründungskörpern auf kohäsionslosem Sand“ In: Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Band 22

LINGS, M. L., NASH, D. F. T und NG, C. W. W. (1993): „Reliability of Earth Pressure Measurements Adjacent to a Multi-Propped Diaphragm Wall“, In Retaining Structures, Ed. C.R.I. Clayton, 258-269; discussion 301-304 and 312-313, Thomas Telford, London.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. (1993): „Concrete Structures, Properties and Materials“, Second Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

MOKAREM, D. W., MEYERSON, R. M., WEYERS, R. E. (2003): „Development of Concrete Shrinkage Performance Specifications“, Final Contract Report, Virginia Transportation Research Council

MONFORE, G. E. (1950): „An Analysis of the Stress Distribution In and Near Stress Gauges Embedded in Elastic Solids“, Structural Laboratory Report No. SP26, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colo.

NEGUSSEY, D. und STUEDLEIN, A. (2003): „Geofoam Fill Performance Monitoring”, Draft Final Report, Geofoam Research Center Syracuse University, UT DOT Draft Final Report No. UT-03.17

NEMATI, K. M. (2003): „Volume Change and Creep of Concrete”, University of Washington, Department of Construction Management, Fall Quarter 2003

NEUBER, H. (1955): „Bau und Erprobung einer Bodendruck-Messdose zur Messung statischer und dynamischer Beanspruchungen”, Baumaschine u. Bautechnik 2, Heft 5, pp. 149-153

NICHOLS, T.H., BAILEY, A. C., JOHNSON, C. E., GRISSO, R. D. (1987): „A Stress State Transducer for Soil”, Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, Vol. 30, pp. 1237-1241

PAUL, P., WALTER, F. (2004): „Messung der Spannungsänderung im Fels und an Felsbauwerken mit Druckkissen“, Empfehlung Nr.19 des Arbeitskreises 3.3 – Versuchstechnik Fels – der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, Bautechnik, Sep 2004, pp. 639 – 647

PEARMAN, B. K, WAY, T. R., JOHNSON, C. E., BURT, E. C., BAILEY, A. C., RAPER, R. L. (1996): „Soil Stress and Rut Depths from Tires of a Mechanical front Wheel Drive Tractor”, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Vol. 39, pp. 1249-1257

PEATTIE, K. R. und SPARROW, R. W. (1954): „The Fundamental Action of Earth. Pressure Cells”, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 2, No. 3, pp. 141-155

PLANNERER, M., (1998): „Temperaturspannungen in Betonbauteilen während der Erhärtung“, in: Dissertation an der Technische Universität München

PRANGE, B. (1965): „Ein Beitrag zum Problem der Spannungsmessung im Halbraum“, Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik u. Grundbau, TH Karlsruhe, Heft 18

READYMIX (2003): „Techniques of Cold Weather Concreting”, Concrete Made Easy

REIFF, C. M., LINGER, D. A. (1967): „Investigation of Buried Domes-Phase I-Evaluation of Instrumentation and Preliminary Tests“, Technical Report AFWL-TR-67-110, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, N.M.

RILEM-Sachstandsbericht: „Methods to Determine Thermal Stresses and Crack Sensitivity in the Laboratory“, RILEM TC 119 TCE, E&FN SPON, London, 1998

ROBERTS, A., HAWKES, J., WILLIAMS, J., DHIR, R. K. (1965): „A Laboratory Study of the Photoelastic Stress-meter“, Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science, pp. 441-457

RÖHLING, S. (2005): „Zwangsspannungen infolge Hydratationswärme“, Baustofftechnologie, Verlagbau + Technik GmbH, Düsseldorf

RUCKER, P., BECKHAUS, K., WIEGRINK, K. H., SCHIEßL, P. (2003): „Temperaturspannungen in dicken Betonbauteilen im jungen Alter“, Beton- und Stahlbetonbau 98, S. 389-397

RUDOLPH, T. (2002): „Ermittlung der Anwendungsgrenzen der Kalorimetrie an exothermen Erhärtungsreaktionen von Bindemitteln, Mörteln und Betonen“ in: Dipl.-Arbeit, Hochschuleanalt, Dessau 2002, Messung im IBA Dessau

SCHNEIDER, M., MENG, B. (2000): „Ressourcenschonung bei der Zementherstellung am Beispiel des Einsatzes von Hüttensand“, Beton-Informationen, No. 1, Düsseldorf

SCHWAB, H. H., GÜNDLING, N., LUTZ, B. (1991): „Monitoring pile raft soil interaction“, Field Measurement in Geotechnics

SELIG, E. T. (1964): „A Review of Stress and Strain Measurement in Soil“, in Proceedings of the Symposium on Soil Structure Interaction, University of Arizona, Tucson, AZ, published by University of Arizona, Tucson, AZ, pp. 172-186

SELLERS, B. (1994): „Load Cell Calibrations“, Geotechnical News, Vol. 12, No. 3, 09/2000

SELLERS, B. (2000): „Temperature Effects on Earth Pressure and Concrete Stress Cells“, in: Geotechnical News, Vol. 18, No. 1, 03/ 2000

SELLERS, B. (2003): „The Measurement of Stress in Concrete“ in: Field Measurement in Geomechanics, Editor. Frank Myrvoll, Balkema, pp. 643 - 656.

TAYLOR, D. W. (1945): „Review of Pressure Distribution Theories and Earth Pressure Cell Investigation“, Chapter 2 in Report to U.S. Army Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss

TAYLOR, D. W. (1947): „Pressure Distribution Theories, Earth Pressure Cell Investigations and Pressure Distribution Data“, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss

VON SOOS, P. (1956): „Entwicklung einer Näherungsformel zur Berücksichtigung des Einflusses der Steifigkeit einer Druckmessdose auf das Messergebnis bei Messung an der Grenze zweier Medien“, Nicht veröffentlichter Umdruck an der TH München

- WEIGLER, H., KARL, S. (1974): „Junger Beton, Beanspruchung – Festigkeit - Verformung“, Betonwerk + Fertigteiltechnik 40 (1974), H. 6 und 7
- WEILER, W. A. und KULHAWY, F. H. (1978): „Behavior of Stress Cells in Soil“, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, Report 78-2
- WEILER, W.A., KULHAWY, F.H. (1982): „Factors Affecting Stress Cell Measurement in Soil“, Journal Geot. Eng. Dev., Vol. 108, No. GT12
- WESCHE, K. (1993): „Baustoffe für tragende Bauteile“. in: Band 2, (3. Auflage) Bauverlag GmbH Wiesbaden-Berlin.
- WILSON, S.D. (1984): Personal Communication, Aug. 29
- YANG, M.Z., DRUMM, E. C., BENNETT, R. M. und MAULDON, M. (1999): „Measurement of Earth Pressures on Concrete Box Culverts under Highway Embankments“, Field Instrumentation for Soil and Rock, ASTM STP 1358, American Society for Testing and Materials, pp. 87-100
- YANG, Z., DRUMM, E. C., BENNETT, R. M., MAULDON, M. (2001): „Temperature Effects on Contact Earth Pressure Cells: Inferences from Long Term Field Instrumentation“, Geotechnical Instrumentation News, Vol. 19, No. 2, pp. 25-28

ANHANG A

Verzeichnis häufig verwendeter Bezeichnungen und Symbole

Interfels	schwingende Saite Druckmessdose, hergestellt von Firma Interfels
D1 bis D7	elektrische Erddruckgeber, hergestellt von Firma Glötzl
S1 bis S5	Messuhr zur Messung der Setzung
H	Höhe
D	Durchmesser
D_D	Durchmesser der Druckmessdose
R_D	Radius der Druckmessdose
H_D	Höhe (Dicke) der Druckmessdose
D_U	Durchmesser der Ummantelung
H_U	Höhe (Dicke) der Ummantelung
σ	Spannung [kN/m ²]
σ_B	Normalspannung im Boden[kN/m ²]
σ_D	gemessene Normalspannung bei Druckmessdose[kN/m ²]
σ_U	die über die Ummantelungskreisfläche gemittelte Normalspannung [kN/m ²]
E_U	Elastizitätsmodul des Materials der Ummantelung
E_B	Elastizitätsmodul des Materials des Bodens
E_U	Elastizitätsmodul des Materials der Druckmessdose
T	Temperatur [°C]
Temp	Temperatur [°C]
T_{max}	Maximaltemperatur durch Abbindeprozess im Beton
DMS	Dehnungsmessstreifen
StDMS	Stahl Dehnungsmessstreifen, hergestellt von Firma Interfels
IBeDMS	Betondehnungsmessstreifen, Länge: 150 mm, hergestellt von Firma Interfels
GBeDMS 155	Betondehnungsmessstreifen, Länge: 155 mm, hergestellt von Firma Geokon
GBeDMS 55	Betondehnungsmessstreifen, Länge: 55 mm, hergestellt von Firma Geokon
GBeDMS 250	Betondehnungsmessstreifen, Länge: 250 mm, hergestellt von Firma Geokon
DMD 375	Betondruckmessdose, Fläche: 375 cm ² , hergestellt von Firma Geokon
DMD 200	Betondruckmessdose, Fläche: 200 cm ² , hergestellt von Firma Interfels
w/z	Wasserzementwert
ε	Dehnung [-]
α_t	Temperaturdehnzahl [1/K]
ΔT	Temperaturdifferenz [K]
ϕ	Kriechzahl [-]
beh	behindert
inel	inelastisch
el	elastisch
W.l	Wasserlagerung
L.a.l	Lagerung an Luft

ANHANG B

Abbildungen 1 bis 15

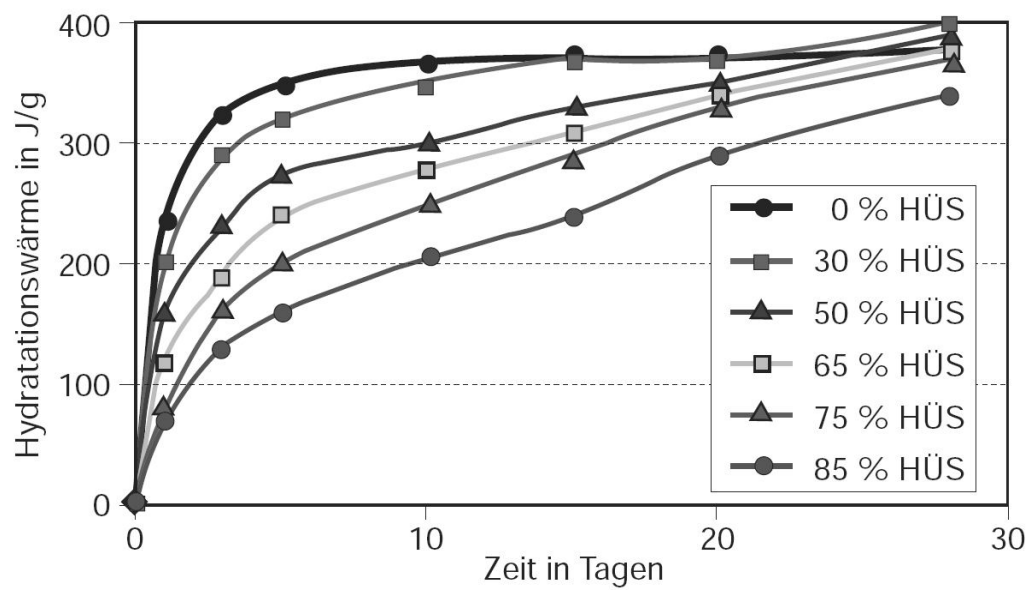


Abbildung 1: Abhängigkeit der Hydratationswärmeentwicklung (in J/g Zement) vom Hüttensandgehalt [WESCHE, 1993]

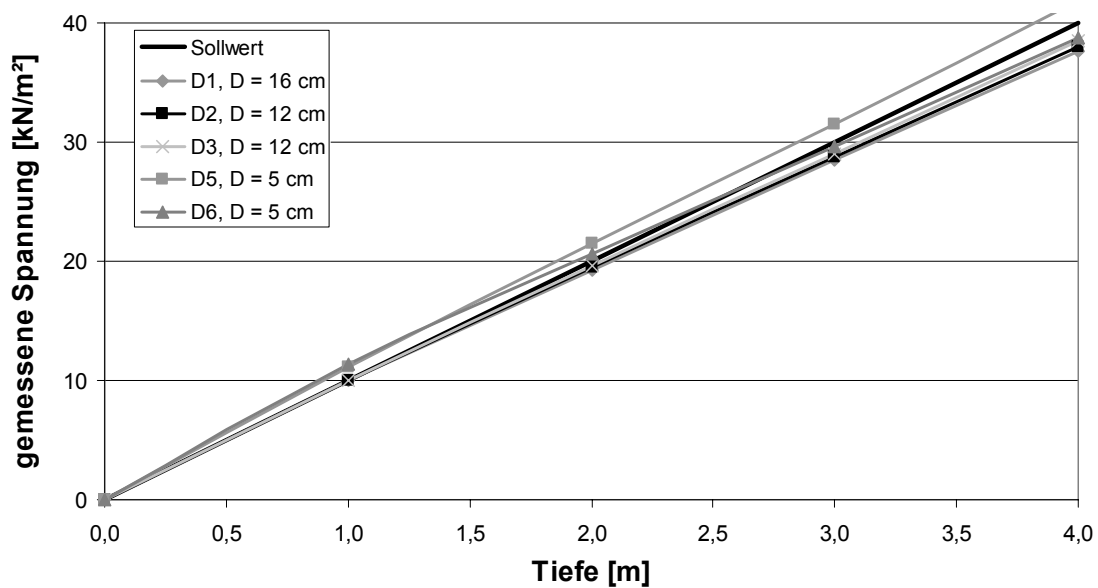


Abbildung 2: Kalibrierung der Druckmessdosen im Wasser

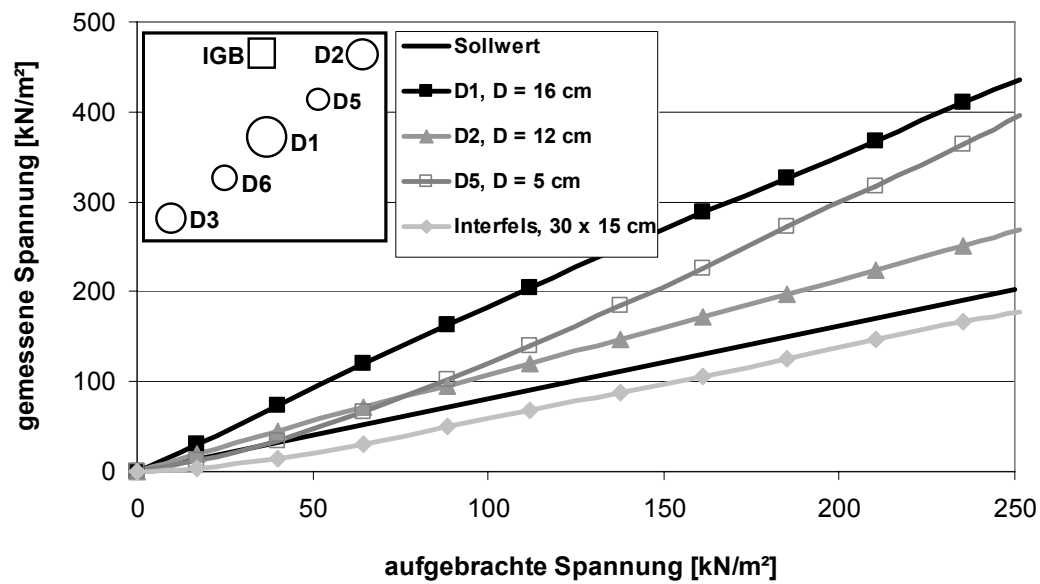


Abbildung 3: Verhältnis von gemessener und aufgebrachter Belastung, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m, unterschiedliche Druckmessdosen, Einbettung in feinem Sand, Gummimatte unter Belastungsplatte

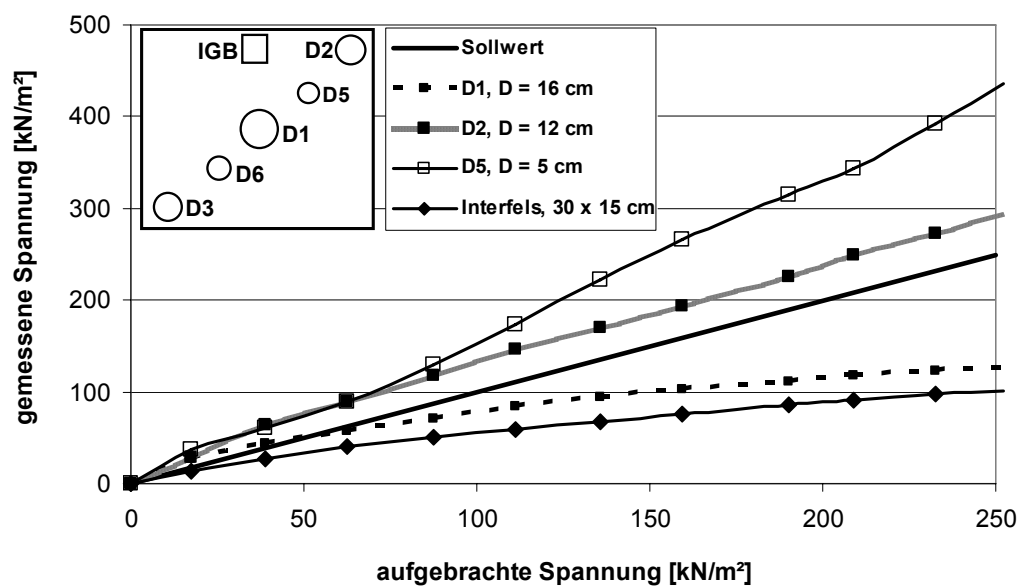


Abbildung 4: Verhältnis von gemessener und aufgebrachter Belastung, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m, unterschiedliche Druckmessdosen, Einbettung in Ton ($W = 32\%$), Gummimatte unter Belastungsplatte

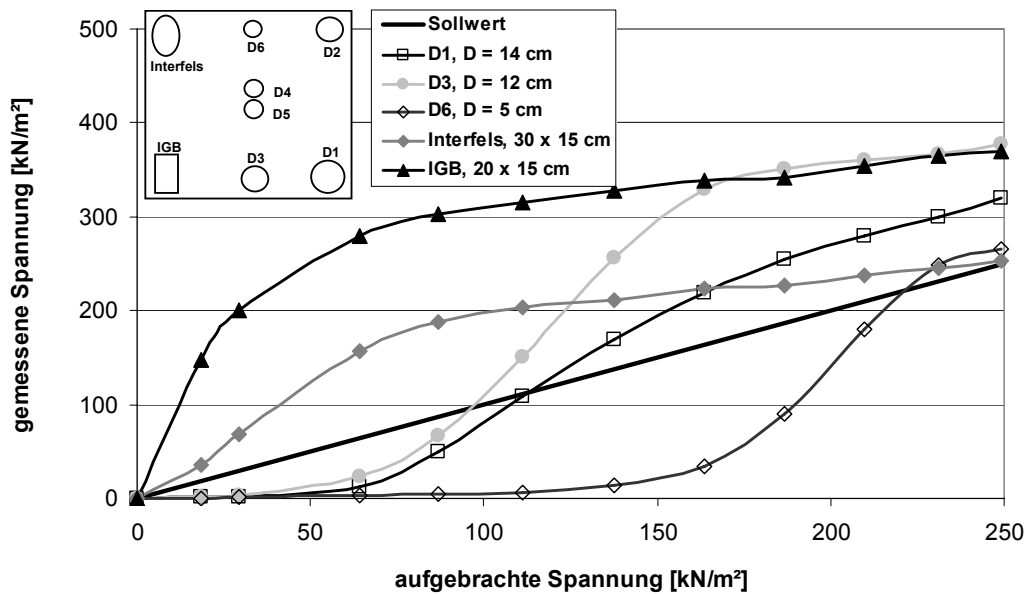


Abbildung 5: Verhältnis von gemessener und aufgebrachter Belastung, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m, unterschiedliche Druckmessdosen, Einbettung in feinem Sand, Polystyrolplatte unter Belastungsplatte

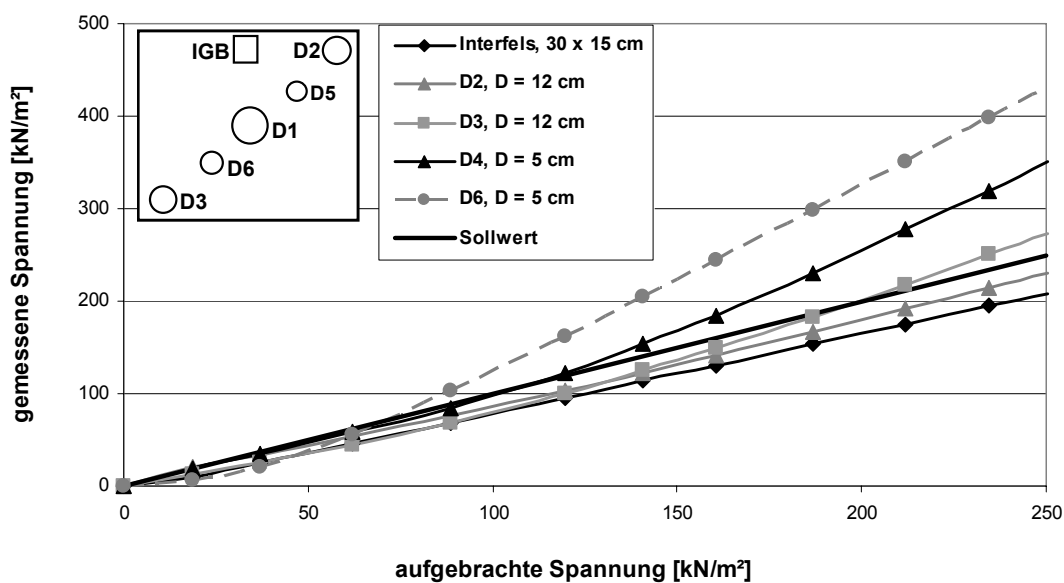


Abbildung 6: Verhältnis von gemessener und aufgebrachter Belastung, Belastungsplattengröße: 0,9 x 0,9 m, unterschiedliche Druckmessdosen, Einbettung in feinem Sand, Drainagematte d = 0,22 cm unter Belastungsplatte

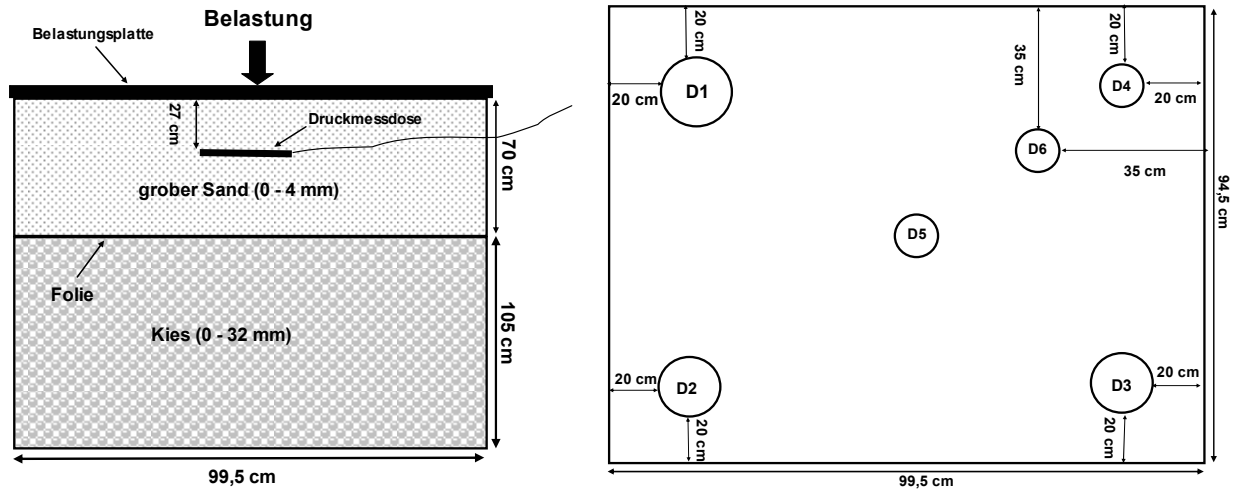


Abbildung 7: schematische Einbau und Lage der Druckmessdosen bei Untersuchung in Biaxialgerät, Plattengröße: 0,93 x 0,93 m

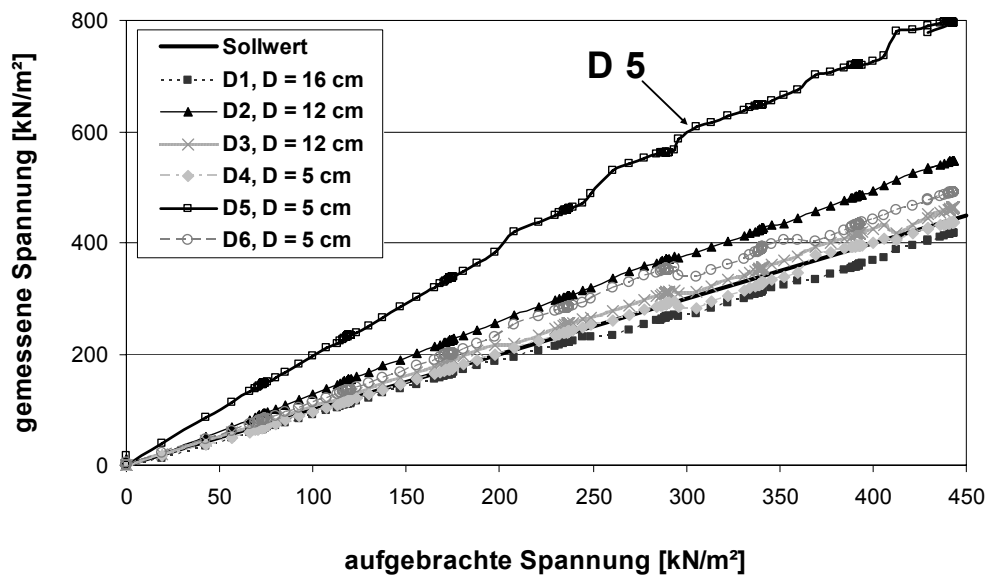


Abbildung 8: gemessene Spannungsverteilung, Belastungsplatte: 0,93 x 0,93 m (Biaxialgerät)

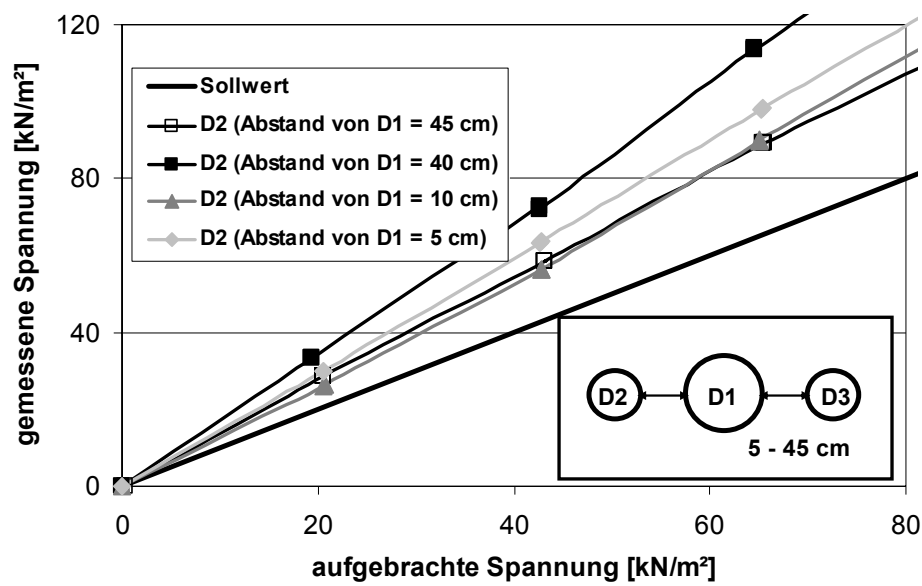


Abbildung 9: Einfluss des variierenden Abstandes von D2 bei zunehmendem Abstand zu D1

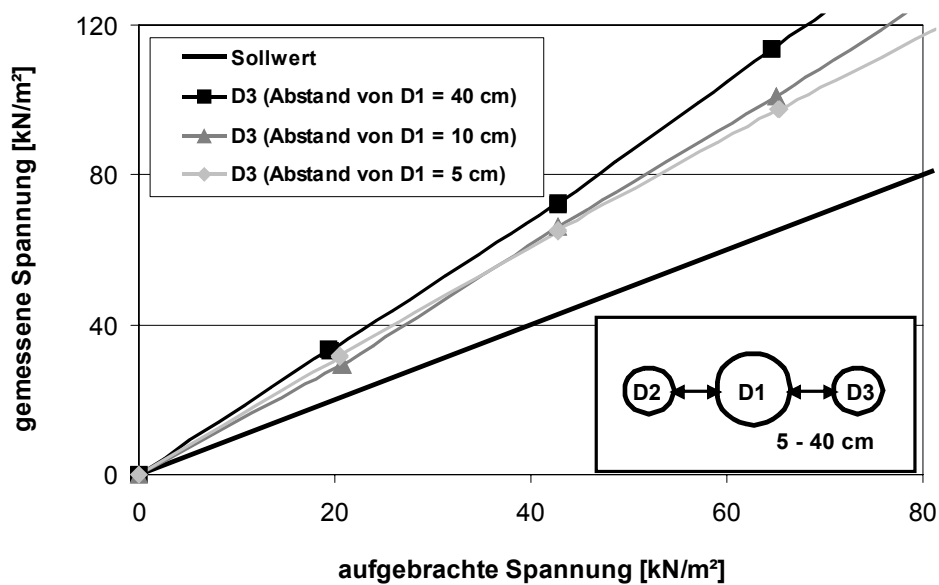


Abbildung 10: Einfluss des variierenden Abstandes von D3 bei zunehmendem Abstand zu D1



Abbildung 11: Umgebungstemperatur (ca. 0°C) während den ersten 24 Stunden

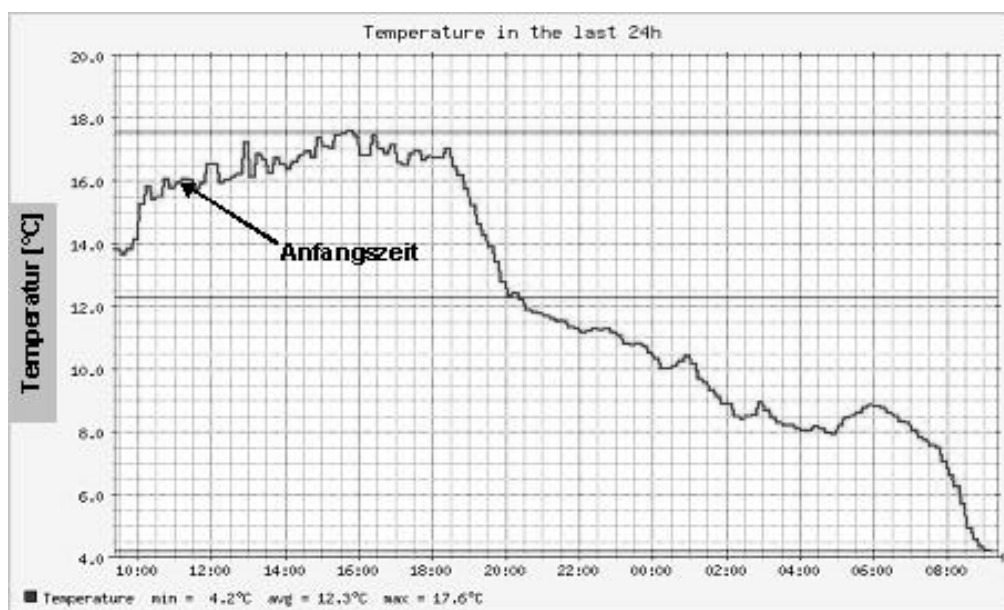


Abbildung 12: Umgebungstemperatur (ca. 17°C) während den ersten 24 Stunden

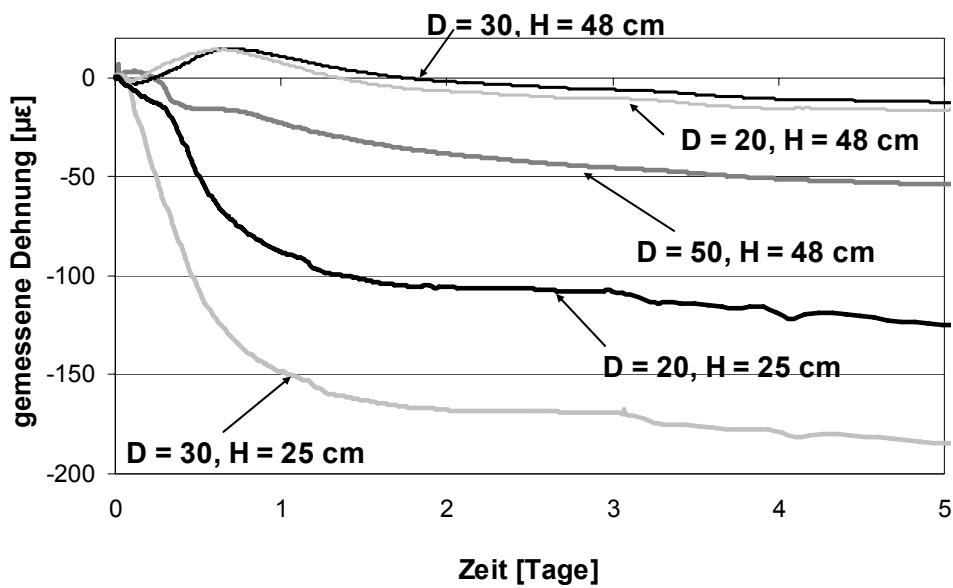


Abbildung 13: Dehnungsänderungen in den ersten 5 Tagen, variierende Abmessungen, CEM I (42,5), w/z-Wert 0,50

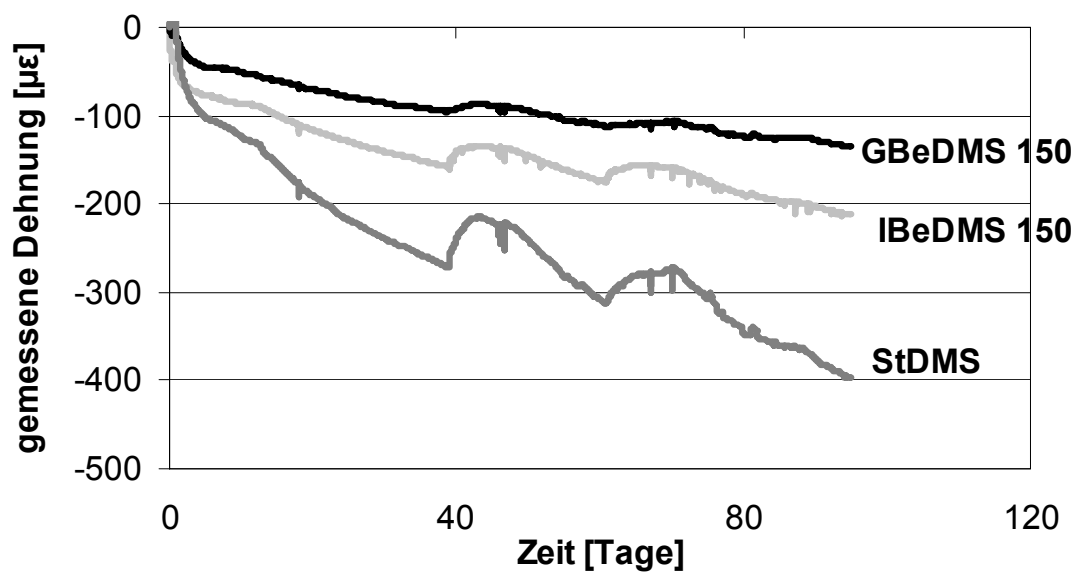


Abbildung 14: Vergleich unterschiedlicher Messgeber, Betonkörper 8

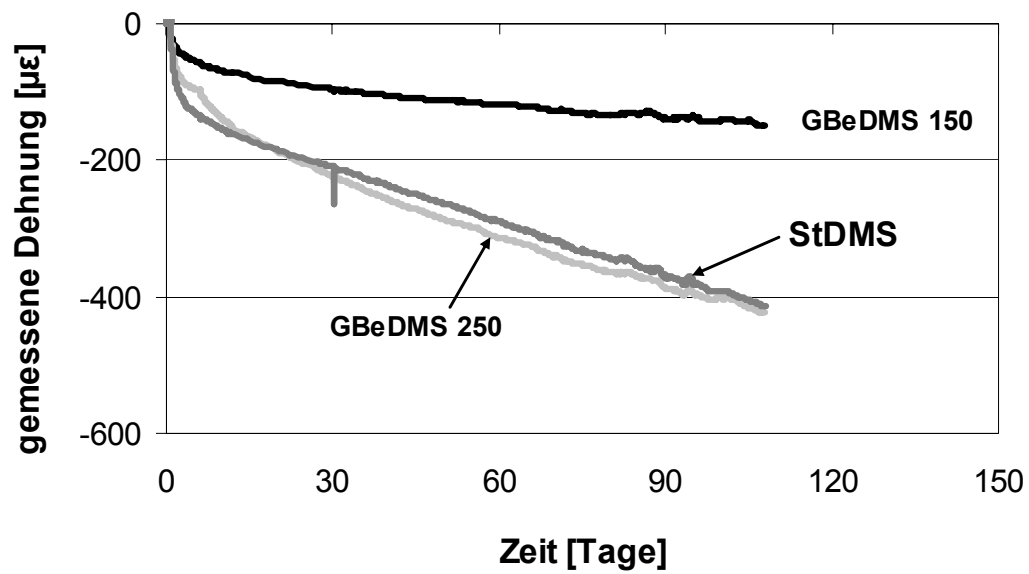


Abbildung 15: Vergleich unterschiedlicher Messgeber, Betonkörper 6

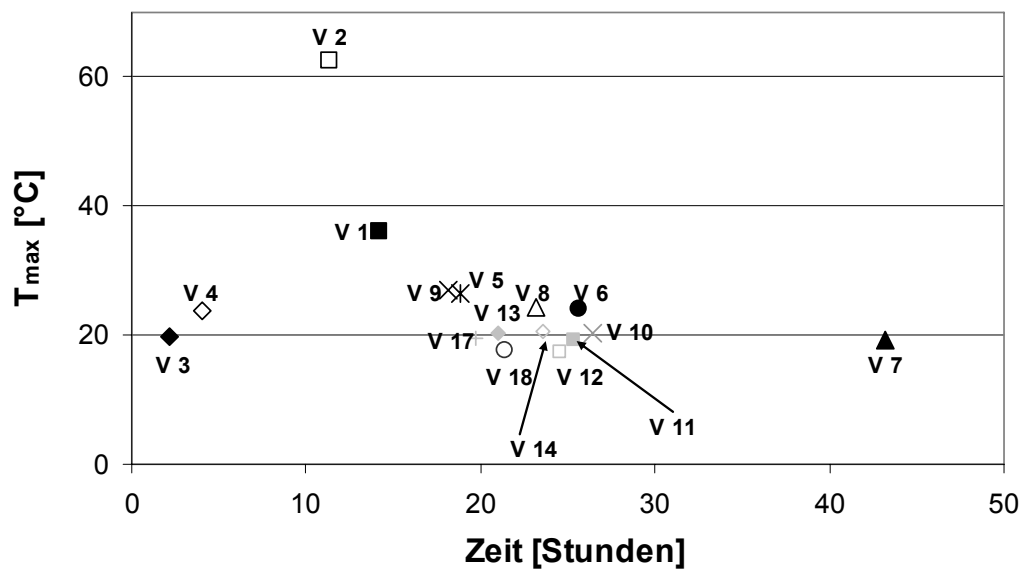


Abbildung 16: Größe und Zeit von gemessener Maximaltemperatur in verschiedenen Betonkörpern

ANHANG C

Tabellen C1 bis C4

Tabelle C.1: Probenabmessungen und verwendete Messsensoren

Versuch	Umgebungstemperatur	verwendete Sensoren	Abmessung		w/z	Zementart	Sonstiges
			H [m]	D [m]			
1	20°	DMD Geokon, DMS 4210 Stahl DMS, Beton DMS	0,48	0,50	0,67	CEM I 42,5	-
2	16 bis 24°	DMD Interfels, DMS 4202 Stahl DMS, Beton DMS	0,48	0,50	0,67	CEM I 42,5	Temperatur (68°C)
3	16 bis 19°	DMD Geokon, DMS 4202 DMS 4210, Stahl DMS	0,48	0,50	0,61	CEM I 42,5	-
4	21,5 bis 24,5°	DMD Interfels, DMS 4210 Stahl DMS, Beton DMS	0,48	0,50	0,67	CEM I 42,5	1 Woche unter Wasser
5	22 bis 24°	DMD Geokon, DMS 4210	0,48	0,50	0,67	CEM III/B 32,5	-
6	16 bis 18°	DMS 4200, DMS 4210 Stahl DMS	0,48	0,50	0,50	CEM I 42,5	-
7	16 bis 20°	DMS 4200, DMS 4210 Stahl DMS	0,48	0,50	0,50	CEM III/B 32,5	-
8	13 bis 17°	DMD Geokon, DMS 4200 Stahl DMS, Beton DMS	0,48	0,50	0,59	CEM II/A-S 52,5 R	-
9	13 bis 17°	DMD Geokon, DMS 4200 DMS 4210, Stahl DMS	0,48	0,50	0,67	CEM II/A-S 52,5 R	-
10	12 bis 13°	DMS 4202, DMS 4210 Stahl DMS	0,48	0,50	0,59	CEM I 42,5	Wasserlagerung
11	16 bis 18°	DMS 4202, DMS 4200 Stahl DMS	0,48	0,30	0,50	CEM I 42,5	-
12	16 bis 18°	DMS 4200, Stahl DMS Beton DMS	0,48	0,20	0,50	CEM I 42,5	-
13	15 bis 17°	DMS 4200, DMS 4202 Stahl DMS	0,48	0,30	0,56	CEM II/A-S 52,5 R	-
14	15,5 bis 18,5°	DMS 4200, DMS 4202 Stahl DMS	0,48	0,30	0,67	CEM I 42,5	-
15	-2 bis 2 (0°C)	DMS 4210, Stahl DMS Beton DMS	0,48	0,50	0,65	CEM I 42,5	-
16	4 bis 17 (10°)	DMS 4200, Stahl DMS Beton DMS	0,48	0,50	0,50	CEM I 42,5	-
17	15 bis 19°	DMS 4200, DMS 4202	0,25	0,30	0,50	CEM I 42,5	-
18	15 bis 19°	DMS 4200	0,25	0,20	0,50	CEM I 42,5	-

Tabelle C.2: Betonzusammensetzung und die Eigenschaften von Betonkörper

Versuch	Betonzusammensetzung [kg/m³]			Fließmittel FM 95 (ml pro kg Zement)
	Wasser	Zement	Zuschlag	
1	216,5	323	1780	-
2	216,5	323	1780	-
3	197	323	1820	-
4	216,5	323	1780	-
5	216,5	323	1780	-
6	155,5	310	1933	30

7	168	338	1700	30
8	177	300	1825	27
9	216,5	323	1780	-
10	192	325,5	1800	25
11	155,5	310	1933	30
12	155,5	310	1933	30
13	170	303,6	1850	21
14	216,5	323	1780	-
15	210	323	1800	30
16	155,5	310	1933	30
17	155,5	310	1933	30
18	155,5	310	1933	30

Tabelle C.3: Zusammensetzung der Zement nach DIN EN 197-1 [BK 1, 2001]

	Hauptbestandteil	Portlandzementk linker	Hüttensand	Nebenbestan dteil	
Zementart	Bezeichnung				
I	Portlandzement	I	95 - 100	-	0 - 5
II	Portlandhüttenzement	II/A-S	80 - 94	6 - 20	0 - 5
III	Portlandsilikastaubzement	III/B	20 - 34	66 - 80	0 - 5

Tabelle C.4: Gegenüberstellung alter und neuer Bezeichnung verwendeter Zemente [BK1, 2001]

Alte Bezeichnung DIN 1164 (30/90)		Neue Bezeichnung DIN 1164 197-1	
PZ	Portlandzement	CEM I	Portlandzement
EPZ	Eisenportlandzement	CEM II/A-S CEM II/B-S	Portlandhüttenzement
HOZ	Hochofenzement	CEM III/A CEM III/B	Hochofenzement

Lebenslauf

Name: **Kaveh Ahangari**
Adress: Institut für Geotechnik und Markscheidewesen
Erzstr. 18
38678 Clausthal-Zellefeld

Geburtsdatum: 19. Februar 1974
Geburtsort: Khorramshahr / Iran
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: Iranisch

Schul Ausbildung

1980 – 1992
Grundschule, Mittelschule und
Gymnasium in Aligoudarz, Provinz Lorestan / Iran
Abschluss: Abitur mit den Schwerpunktfächern Physik
und Mathematik

Hochschulausbildung

1992 – 1997
Bachelorstudium des Bergbauingenieurwesens an
der Universität Yazd in Yazd / Iran
Abschluss: B.Sc. Bergbauingenieur

Abschlussarbeit:
Planung und Entwicklung des Bausteintagebaues
'SAVAR'

1997 – 2000
Masterstudium des Bergbauingenieurwesens an der
Tarbiat Modares Universität in Teheran / Iran
Fachrichtung: Felsmechanik
Abschlussarbeit:
An Investigation on Stability and Support of Intake Rock
Slopes of Karun 3 HEPP
Abschluss: M.Sc. Felsmechanikingenieur
Dieses Examen wurde von der TU Clausthal als dem
Diplom gleichwertig anerkannt.

Berufliche Tätigkeit

seit 07/2002
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am
Institut für Geotechnik und Markscheidewesen,
Arbeitsgruppe Geotechnische Verfahren,
der Technische Universität Clausthal

Bisher erschienen:

- | | |
|--------------|--|
| Heft 1/1999 | KLAUS MAAS: Modellierung gekrümmter Flächen zur Unterstützung der markscheiderischen Bearbeitung von Speicherkavernen im Salzgebirge |
| Heft 2/1999 | THOMAS BÜRGER: Entwicklung eines Systems für CAD-gerechte As-Built Dokumentation verfahrenstechnischer Anlagen unter Nutzung der digitalen Nahbereichsphotogrammetrie |
| Heft 3/2000 | JANETTE LINKE: Zur Analyse der Geometrie und Beurteilung von geodätischen und mechanischen Netzen unter Verwendung von Balancierungsfaktoren |
| Heft 4/2001 | ANDREAS STREERATH: Analyse und Modellierung großräumiger bergbaubedingter Senkungen aus photogrammetrischen Beobachtungen |
| Heft 5/2005 | CHRISTIAN FISCHER: Eignung hyperspektraler Fernerkundungsdaten zur Erfassung von Umweltauswirkungen des Steinkohlenbergbaus |
| Heft 6/2001 | ENRICO MARKUS: Unternehmensübergreifende Koordination von Flächenrecyclingprojekten auf Basis einer integrierten Groupwarelösung |
| Heft 7/2004 | SVEN SCHWERDT: Untersuchungen zur Ableitung eines Bemessungsverfahrens für die Überbrückung von Erdeinbrüchen unter Verwendung von Geokunststoffbewehrungen |
| Heft 8/2005 | SANDRA FAHLAND: Verformungsverhalten einer kombinierten Bogen-Gewichtsstaumauer unter Betriebsbedingungen |
| Heft 9/2005 | LUTZ PETRAT: Das Potenzial der Multi-Basislinien Radarinterferometrie zur Detektion kleinräumiger vertikaler Bodenbewegungen |
| Heft 10/2005 | ANDREA RICHWIEN: Untersuchungen zur Standsicherheit von Unterwasserböschungen aus nichtbindigen Bodenarten |
| Heft 11/2005 | AXEL NERNHEIM: Interaktionsverhalten von Geokunststoff und Erdstoff bei statischen und zyklischen Beanspruchungen |
| Heft 12/2005 | RAINER ROOSMANN: Objektorientierte Modellierung temporaler GIS-Applikationen - Am Beispiel einer TGIS-Unterstützung für das Monitoring bergbaubedingter Umwelteinwirkungen - |
| Heft 13/2006 | FLORIAN BUSSERT: Verformungsverhalten geokunststoffbewehrter Erdstützkörper – Einflussgrößen zur Ermittlung der Gebrauchstauglichkeit |
| Heft 14/2006 | JOACHIM LEONHARDT: Die Aussagefähigkeit des Rißwerks hinsichtlich makropetrographischer Informationen im Steinkohlenbergbau des niederrheinisch-westfälischen Oberkarbons |

ISBN 3-938924-06-3